

УДК 669.162.2

*д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Стародубцев Б. И.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
к.т.н. Вишневский Д. А.,
Орлов А. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Представлены методика проведения и результаты модельных исследований работы установки для реализации двухстадийного процесса приготовления пылеугольного топлива, предполагающего предварительное разрушение кусков угля в молотковой дробилке и последующее получение требуемой фракции материала в вертикальном роторном измельчителе.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, молотковая дробилка, роторный измельчитель, фракционный состав, модельный комплекс.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений дальнейшего совершенствования доменного производства является энергосбережение при ведении технологического процесса выплавки чугуна. Учитывая то обстоятельство, что основные энергетические затраты при получении жидкого чугуна в доменной печи связаны с потреблением дорогостоящего кокса, на протяжении последних сорока лет специалистами предлагались разнообразные меры по сокращению расхода кокса на тонну производимого металла, предполагающие его замену другими видами топлива, имеющими меньшую стоимость. Наиболее перспективным в этом отношении следует считать использование пылеугольного топлива для частичного замещения кокса. Как известно, угольная пыль в доменной плавке может заменить 100 % природного газа и до 40 % кокса. При этом удастся также повысить производительность печи и оперативно влиять на температурное состояние горна [1]. Эффективность технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива определяется полнотой его сгорания. В свою очередь, при неизменной температуре фурменной зоны режим горения пыле-

угольного топлива зависит от формы и размеров вдуваемых частиц угля, их пористости, порозности и химического состава. Указанные параметры мелкодисперсного топлива определяются условиями его приготовления. Такой вид альтернативного топлива получают на специальных установках, включающих систему питающих бункеров и мельниц различного конструктивного исполнения [2]. В результате многочисленных исследований установлены оптимальные размеры частиц пылеугольного топлива, находящиеся в пределах 35–100 мкм. Таким образом, для измельчения угля в условиях функционирования установок для приготовления пылеугольного топлива нужны мельницы, обеспечивающие тонкий помол зернистых материалов. Наряду с этим они также должны иметь требуемую производительность, достаточную для бесперебойной работы системы вдувания топлива в зону горна доменных печей с большим рабочим объемом. Поэтому разработка новых и модернизация существующих дробилок и мельниц, одновременно отвечающих указанным требованиям, имеет важное научно-практическое значение [3].

Постановка задачи. Одним из возможных вариантов совершенствования устано-

вок приготовления пылеугольного топлива является применение работающих в связке двух дробильных систем, позволяющих при комплексном использовании получать угольную пыль требуемого качества и в нужных количествах. В связи с этим сотрудниками кафедр «Механическое оборудование заводов черной металлургии» ДонНТУ и «Машины металлургического комплекса» ДонГТИ в рамках соглашения о научно-техническом сотрудничестве инициировано начало исследований двухстадийного процесса приготовления пылеугольного топлива, предполагающего предварительное разрушение кусков угля в молотковой дробилке и последующее получение требуемой фракции материала в вертикальном роторном измельчителе.

Изложение материала и его результаты. Разработка новых дробильных систем предусматривает предварительную проверку правильности принимаемых технических решений на действующих физических моделях, что позволяет при расчете и конструировании опытных образцов оборудования данного класса избежать серьезных проектных ошибок. Потому в соответствии с планом экспериментальных исследований спроектировали и изготовили лабораторный комплекс [4], конструктивная схема и общий вид которого показаны на рисунке 1. Он включает натурную модель бункера-питателя 4 для моделирования процесса приготовления пылеугольного топлива, имеющего в верхней своей части загрузочный люк, герметично закрываемый крышкой 5.

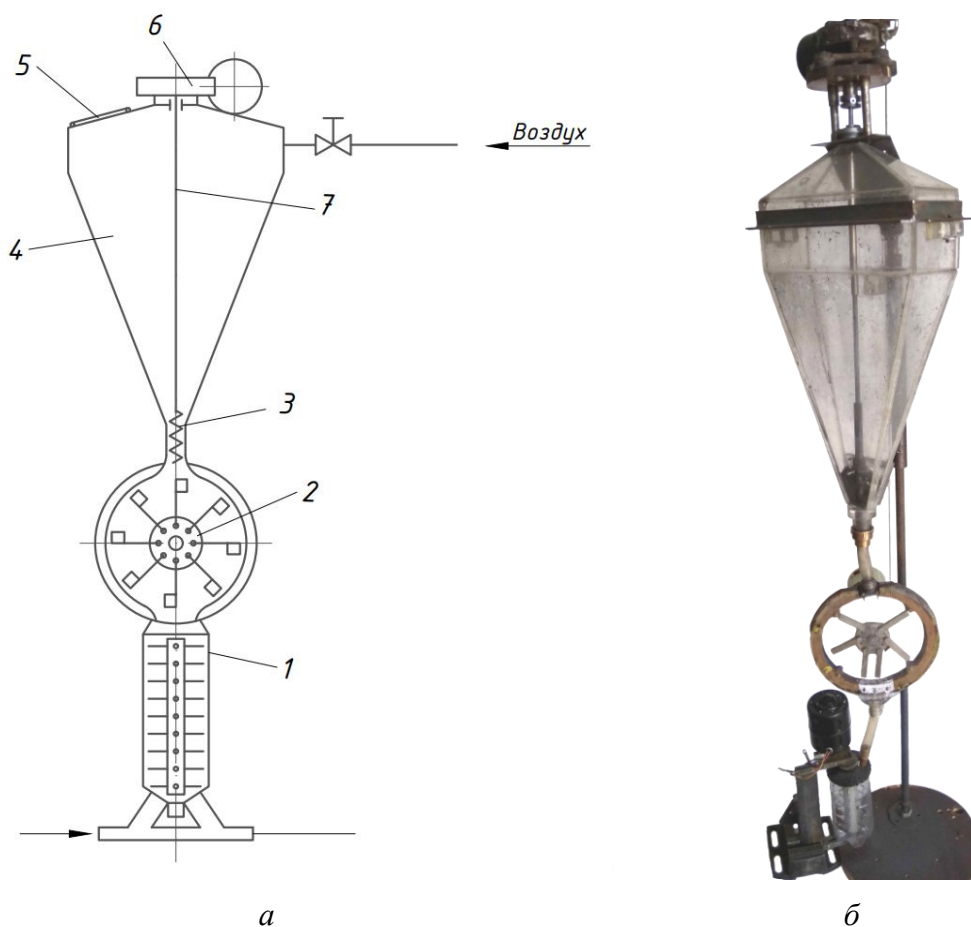


Рисунок 1 Конструктивная схема (а) и общий вид (б) лабораторного комплекса

Внутри бункера в двух подшипниковых опорах установлен вертикально расположенный вал 7, нижний хвостовик которого несет шнек 3, а верхний хвостовик связан с тихоходным валом червячного мотор-редуктора 6. При этом часть витков шнека, являющихся заборными, находится в полости бункера, а остальные размещены соосно в цилиндрической камере, связывающей его с моделью молотковой дробилки

билки 2, которая, в свою очередь, герметично соединена с моделью вертикального роторного измельчителя 1. Для создания избыточного давления в полость бункера может с регулируемым расходом подаваться воздух, имитирующий нейтральный газ, а в выходной трубопровод, сообщающийся посредством закрытых течек с камерой измельчителя, предусмотрена подача транспортирующего газа.

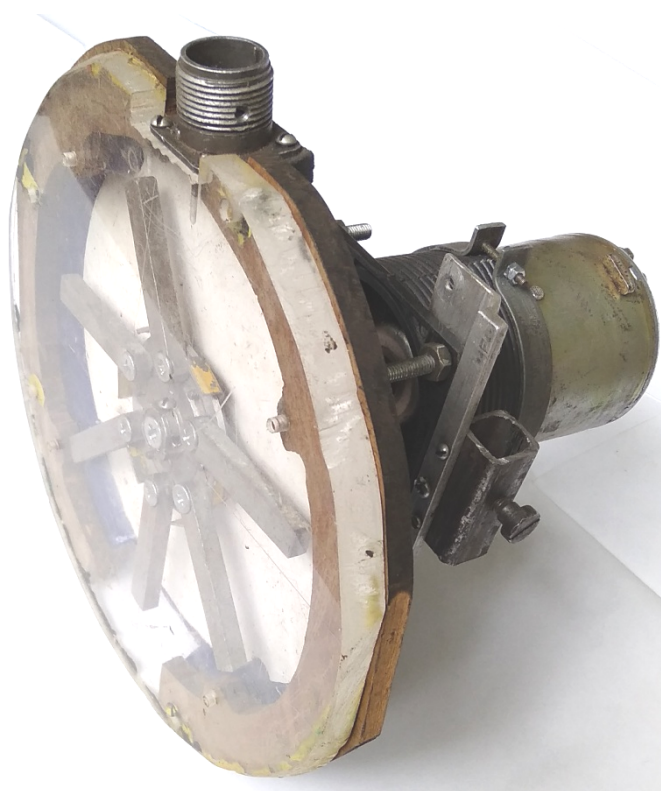


Рисунок 2 Действующая физическая модель молотковой дробилки

Натурная модель молотковой дробилки (рис. 2) служит для изучения процесса ударного взаимодействия подвергаемых разрушению кусочков угля с её рабочими элементами, выполнена односекционной. В её состав входит пустотелый цилиндрический корпус, передняя торцевая стенка которого выполнена из прозрачного материала, а с задней его металлической стенкой жестко связан электродвигатель постоянного тока с регулируемой частотой вращения вала, на котором установлен диск, несущий шарнирно закрепленные

посредством осей молотки. Корпус модели в верхней и нижней частях имеет загрузочные и выгрузочные каналы. При этом зазоры между торцевыми стенками обоих каналов соответствуют размерам кусочков угля, поступающих на дробление и получаемых после него.

Благодаря секторальным углублениям в корпусе диска размещенные в них на осях молотки имеют возможность отклонения на некоторый угол (до 30°) от своего радиального положения как в направлении вращения, так и против него.

Действующая модель вертикального роторного измельчителя, показанная на рисунке 3, необходима для изучения особенностей процесса получения мелкой фракции уголь-

ного топлива. Она содержит выполненный из прозрачного материала цилиндрический корпус с соосно размещенным внутри в подшипниковых опорах ротором.



Рисунок 3 Натурная модель

В тело ротора на нескольких ярусах, равноудаленных по его длине, ввинчены рассредоточенные по кругу стержни. Подшипниковые опоры ротора закреплены на концах консольных балок, образующих с вертикальной стенкой рамную конструкцию, несущую вертикально расположенный электродвигатель. На его валу установлена шестерня, находящаяся в зацеплении с зубчатым колесом, размещенным на верхнем хвостовике ротора. На верхней торцевой части цилиндрического корпуса выполнены отверстия для закрытых течек, по которым в измельчитель поступает материал из модели молотковой дробилки. К нижней торцевой части корпуса измельчи-

теля прикреплены закрытые течки, своими нижними концами связанные с коллектором, обеспечивающим сбор получаемого пылевидного материала.

Благодаря прозрачности корпусов моделей бункера, молотковой дробилки и роторного измельчителя имелась возможность визуального наблюдения картин движения частиц материала и их взаимодействия с рабочими элементами во время моделирования процесса приготовления пылеугольного топлива. С учетом функционального назначения каждого из структурных блоков лабораторного комплекса модельное исследование провели в три этапа. Первый из них предполагал по-

лучение информации о степени равномерности выдачи из бункера вертикальным шнековым питателем зернистого материала, подлежащего двухстадийному измельчению. Для оценки эффективности функционирования дозирующей системы бункера-питателя при различных размерах выдаваемого кускового материала с помощью сит получили два отсева угольной массы, средний размер частиц которых составил соответственно 8 и 5 мм. Указанные отсева угольных частиц поочередно загружали через верхний люк в полость модели бункера-питателя, под которой размещали приемную емкость, опираю-

щуюся на мездозу. Её тензометрический преобразователь входил в контрольно-измерительную систему, включающую также усилитель переменного тока, АЦП и ПЭВМ. С помощью этой системы отслеживали динамику изменения во времени массы зернистого материала, поступавшего в приемную емкость из бункера при его включенном шнековом дозаторе, настроенном на заданную производительность. В качестве примера на рисунке 4 показаны записи сигналов, зафиксированных при функционировании питающей системы во время выдачи зернистого материала различного фракционного состава.

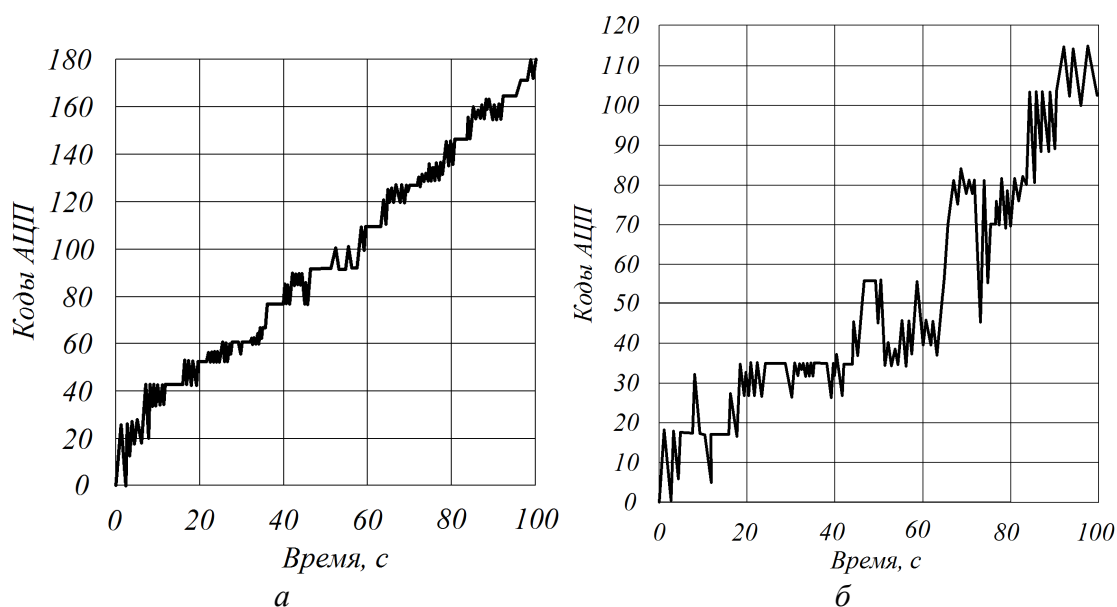


Рисунок 4 Степень равномерности выдачи из бункера-питателя угля с размером кусочков 5 мм (а) и 8 мм (б) при частоте вращения шнека 20 об/мин

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой степени равномерности выдачи зернистого материала вертикальным шнековым питателем, а его производительность зависит не только от частоты вращения, но и от размеров кусков, влияющих на коэффициент заполняемости межвиткового пространства. Чем больше куски угля, тем меньше значения указанного коэффициента из-за наличия пустот между частицами различной формы. Так, при одинаковой частоте враще-

ния вертикального шнека, составлявшей 20 об/мин, зафиксированная производительность питателя для фракций угольных частиц 5 мм и 8 мм была равна 360 и 220 г/мин соответственно, что обусловлено уменьшением коэффициента заполняемости межвиткового пространства вертикального шнека с 0,9 до 0,6.

Требуемую эффективность функционирования молотковой дробилки можно обеспечить при рациональном сочетании масс ударных элементов и скорости вра-

щения несущего их ротора, поскольку в этом случае не только генерируется необходимая для измельчения кускового материала кинетическая энергия молотков, но и снижается уровень возникающей вибрации дробильной системы в целом [5–7].

Поэтому второй этап модельных экспериментов был связан с изучением особенностей динамического взаимодействия шарнирно закрепленных на роторе молотков с кусочками угля, имеющими разную массу. Главной задачей на этом этапе являлось установление минимальных значений частоты вращения ротора, достаточных для обеспечения установившегося процесса дробления при задаваемом соотношении масс молотков модели дробилки и разбиваемых кусочков угля. С этой целью с помощью реостата блока питания плавно изменяли напряжение в сети электродвигателя, вращающего ротор с молотками, и фиксировали момент начала стабилизации режима работы модели дробилки при соответствующем фракционном составе подаваемых в её полость угольных кусочков. Снимая показания вольтметра и амперметра блока питания для каждого из реализуемых режимов функционирования модели дробилки, определили потребляемую электрическую мощность её привода

при соответствующей производительности (табл. 1).

В связи с отсутствием в технической литературе информации о реальной картине взаимодействия молотков дробилки с кусками материала, получившей до настоящего времени только теоретическую интерпретацию [8, 9], практический интерес представляют сведения о траектории движения измельчаемого материала в рабочем пространстве дробильной системы начиная с момента его загрузки. С целью исключения наложений траекторий частиц, усложняющих визуальный контроль процессов, протекающих в полости модели молотковой дробилки, при их видеосъемке подачу кусочков угля осуществляли в дискретном режиме с интервалом 0,5 с. Результаты просмотра в режиме «стоп-кадр» отснятого материала свидетельствуют о том, что после ударного взаимодействия молотка с кусочком угля последний дробится на несколько частей, которые, продолжая круговое движение вдоль внутренней цилиндрической поверхности камеры (рис. 5, а), соударяются с отбойниками и образуют более мелкую фракцию (рис. 5, б), способную покинуть рабочую камеру через щелевое отверстие выгрузочного канала.

Таблица 1

Параметры функционирования модели молотковой дробилки

Масса молотка, г	Масса кусочка угля, г	Частота вращения ротора, об/мин	Напряжение питания, В	Ток питания, А	Потребляемая электрическая мощность, Вт	Производительность модели дробилки, г/с	Удельные затраты энергии, (Вт·с)/г
10	0,15	750	8	2	16	3	5,3
		1000	10	2,5	25	4	6,3
		1250	12	3	36	5	7,2
	0,10	750	8	2	16	4	4,1
		1000	10	2,5	25	6	4,2
		1250	12	3	36	8	4,5
	0,05	750	8	2	16	6	2,7
		1000	10	2,5	25	8	3,1
		1250	12	3	36	10	3,6

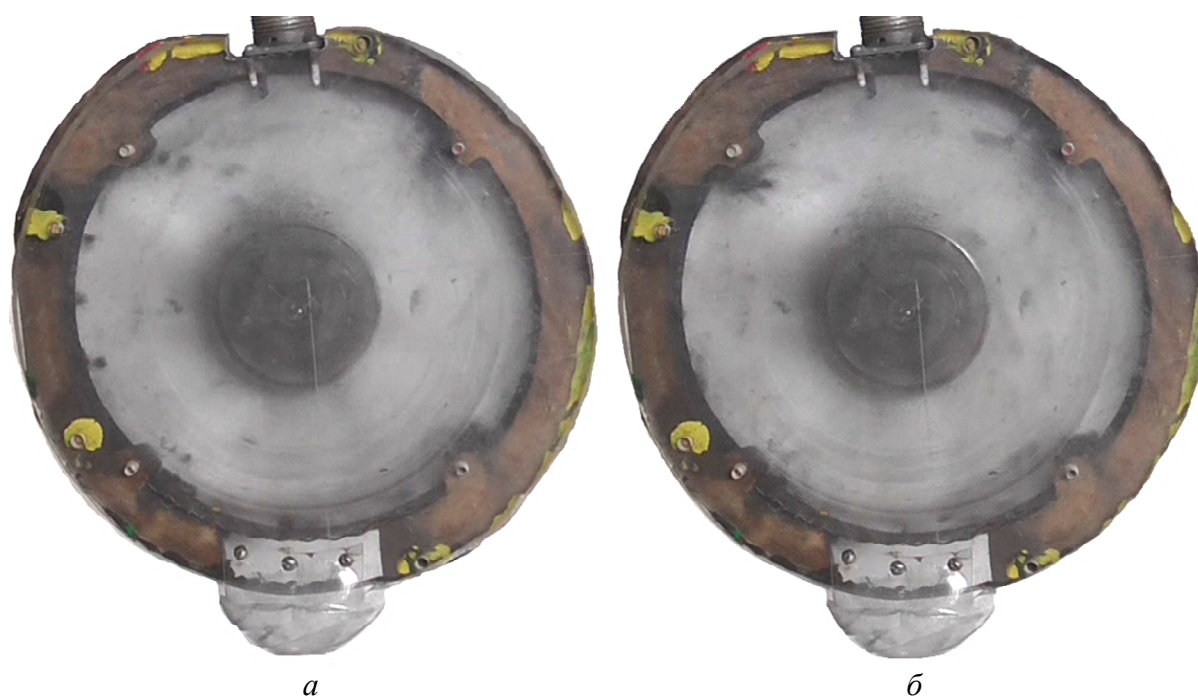


Рисунок 5 Картины разрушения кусочков угля в модели молотковой дробилки

Контроль фракционного состава частиц на выходе из модели молотковой дробилки показал, что процентное соотношение частиц различного размера зависит как от крупности кусочков исходного материала, так и от частоты вращения ротора с молотками (табл. 2).

Заключительный — третий — этап модельных исследований предполагал изучение особенностей процесса тонкого измельчения частиц угля, получаемых на выходе из модели молотковой дробилки и имеющих размер 0,5–2,5 мм. Прежде всего было необходимо установить частоту вращения вертикального ротора модели измельчителя, которая при заданных его параметрах гарантировала получение пылевидных частиц размерами до 100 мкм. Для этого провели серию опытов с варьированием угловой скорости ротора и интенсивности подачи на его рабочие элементы угольных частиц. Визуальные наблюдения с использованием видеосъемки за движением в камере измельчителя частиц, иницируемым группами стержней, вращающихся в нескольких горизонтальных плос-

костях, равномерно рассредоточенных вдоль вертикального ротора, свидетельствовали о том, что образование пылеобразной фракции происходит одновременно во всем рабочем пространстве исследуемой механической системы (рис. 6). Такой режим функционирования измельчителя обеспечивается при частоте вращения его ротора не ниже 1500 об/мин и соответствующей объемной подаче угольных частиц. Данные эксперимента дают основание считать рациональным секундный объем мелкозернистой угольной массы, поступающей в камеру измельчителя, равный 15–25 % её полезного объема.

Если интенсивность подачи измельчаемой массы будет меньше нижнего рекомендуемого предела, резко снизится производительность роторного измельчителя. Превышение верхнего установленного предела интенсивности ввода угольных частиц влечет за собой появление на выходе из измельчителя фракций материала более 100 мкм, что отрицательно скажется на показателях качества приготавливаемого пылеугольного топлива.

Таблица 2

Доля различных фракций угля на выходе из модели молотковой дробилки, %

Частота вращения ротора, об/мин	Исходный размер кусочков угля, мм	Размеры частиц угля после дробления, мм			
		0,5–0,9	1,0–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5
750	8	30	35	22	13
	5	35	45	9	10
1000	8	35	40	14	11
	5	40	40	11	9
1250	8	50	25	16	9
	5	60	20	15	5

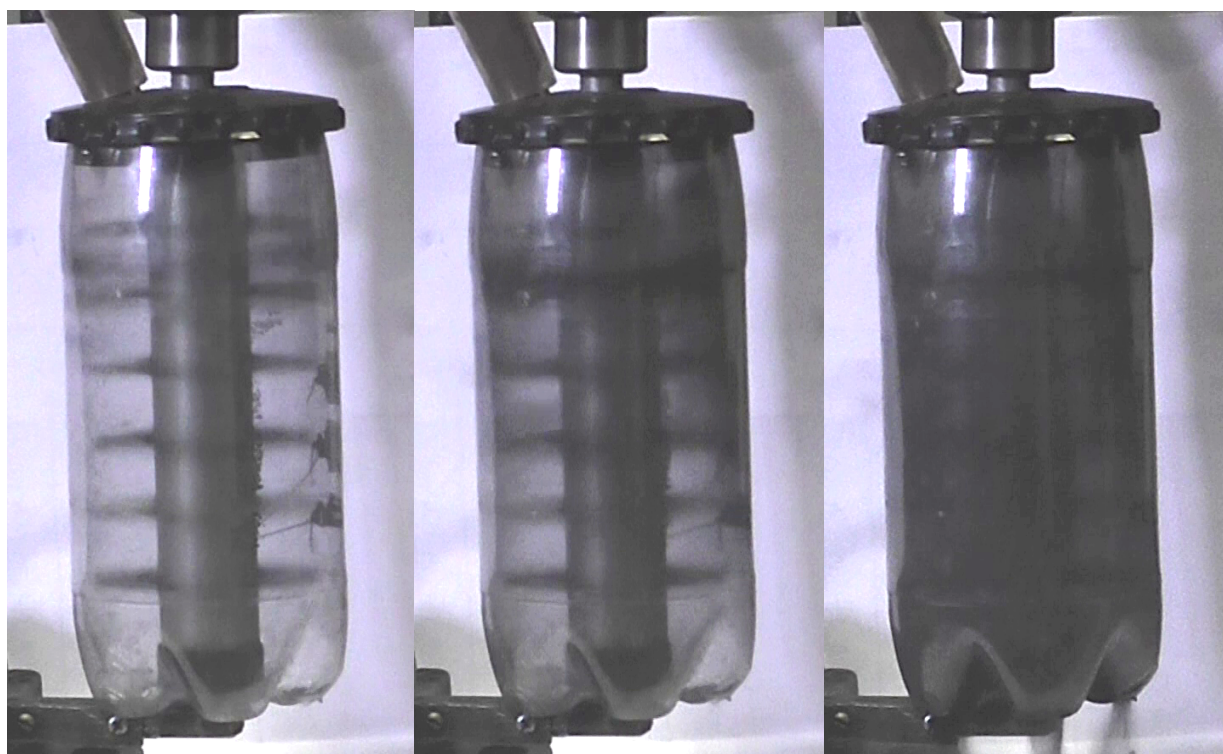


Рисунок 6 Образование пылевидных частиц из зернистого угля в камере модели измельчителя

Выводы. Результаты модельных исследований двухстадийного процесса получения пылеугольного топлива свидетельствуют в пользу того, что он может составить альтернативу уже существующим способам приготовления ПУТ. Поэтому

исследования в данном направлении следует продолжить с целью обоснования конструктивных и энергосиловых параметров опытной установки для практической реализации предложенного процесса.

Библиографический список

1. Ярошевский, С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива [Текст] / С. Л. Ярошевский. — М. : Металлургия, 1988. — 176 с.
2. Особенности вдувания пылеугольного топлива и тепловой работы фурменной зоны доменной печи [Текст] / В. Ю. Шостак [и др.] // Теория и практика металлургии. — 2017. — № 3–4. — С. 21–26.

3. Ульяницкий, В. Н. Анализ конструктивных особенностей и функциональных возможностей мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, А. М. Новохатский, П. А. Петров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — № 9 (52). — С. 105–114.

4. Лабораторный комплекс для моделирования процесса приготовления пылеугольного топлива [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк, 2020. — С. 27–32.

5. Власенко, Д. А. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору [Текст] / Д. А. Власенко, О. И. Павленко, Э. П. Левченко // Металлургические процессы и оборудование. — 2016. — № 3. — С. 21–26.

6. Власенко, Д. А. Особенности измельчения кусковой извести в дробилках ударного действия при различных вариантах подвеса бил [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2015. — № 45. — С. 130–135.

7. Власенко, Д. А. Эффективность дробления известняка в дробилках с вращающимся ротором при реализации различных способов воздействия на материал ударом [Текст] / Д. А. Власенко // Молодежь и XXI век – 2016 : материалы IV международной научной конференции. — Курск, 2016. — Том IV. — С. 94–98.

8. Барабаикин, В. П. Исследование параметров молотковых дробилок на примере дробления газового угля [Текст] / В. П. Барабаикин // Институт горных ископаемых. — 1971. — № 5. — С. 41–49.

9. Власенко, Д. А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2018. — № 3. — С. 9–15.

© Еронько С. П.
 © Стародубцев Б. И.
 © Вишнеvский Д. А.
 © Орлов А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 15.10.2020.

Doctor of Technical Sciences Yeronko S. P., PhD in Engineering Starodubtsev B. I. (DonNTU, Donetsk, DPR), PhD in Engineering Vishnevskiy D. A., Orlov A. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

SIMULATION OF PULVERIZED COAL FUEL PREPARATION PROCESS

The article presents procedure and results of model studies of the unit operation for implementing two-stage process of preparing pulverized coal fuel that involve preliminary cob breaking in hammer crusher and subsequent obtaining of required material fraction in a vertical rotary grinder.

Key words: *pulverized coal fuel, hammer crusher, rotary grinder, fractional composition, model complex.*