



УДК 662.8.052

УГЛЕ-ТОРФЯНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ В КОТЕЛЬНЫХ

А.В. МИХАЙЛОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье описаны результаты экспериментов по созданию угольно-торфяных топливных композиций для сжигания в твердотопливных котлах. Основная цель исследования состояла в разработке комбинации угольной пыли и натурального торфа без связующих добавок. Торф повышает эффективность процесса гранулирования, являясь натуральным связующим. Метод гранулирования позволяет утилизировать отходы угольной промышленности. Совместное сжигание двух видов топлива – угольной пыли и торфа снижает эмиссию диоксидов серы. Стоимость торфяного сырья ниже, чем искусственных связующих, применяемых для брикетирования угольной пыли. Состав смеси угольной пыли и торфа варьировался в объемном соотношении 2:1, 1:1 и 1:2 при влажности смеси перед экструзией 65 %. В процессе подготовительных операций угольного сырья выполнялось его дробление и просеивание через сито 24 меш (0,707 мм). Процедура перемешивания образцов угля и торфа проводилась до получения однородной смеси. После перемешивания смесь помещалась в поршневой пресс для получения гранул. Угольная пыль и влажный торф проходили полужесткую экструзию на поршневом прессе с образованием цилиндрических гранул диаметром 16 мм. После экструзии гранулы подсушивались до эксплуатационной влажности 25 %. Угольно-торфяные топливные гранулы показали достаточную механическую прочность для транспортирования и механической подачи в твердотопливные котлы. Сжигание угольно-торфяных топливных гранул в лабораторных условиях при температуре 800 °C не приводило к спеканию золы. Проведенные предварительные исследования показали перспективность утилизации угольных отходов методом гранулирования в смеси с натуральным торфом.

Ключевые слова: угольная пыль, торфяное топливо, смешивание, гранулирование, гранулированный продукт.

Как цитировать эту статью: Михайлов А.В. Угле-торфяные композиции для сжигания в котельных // Записки Горного института. 2016. Т.220. С.538-544. DOI 10.18454/PMI.2016.4.538

Введение. Развитие топливного баланса распределенной энергетики в Российской Федерации приводит к необходимости широкого использования местных видов топлива. Торф в этом случае может рассматриваться в качестве медленно возобновляемого био- и углеродно-нейтрального топлива [13, 15].

Аналитические тесты показывают, что в торфяных месторождениях, которые могут быть потенциальными топливными источниками ряда существующих электростанций, содержатся низкие количества серы и минеральных включений, а также фактически отсутствует ртуть [2, 13]. Соответственно, совместное сжигание торфа и угля может приводить к сокращению выбросов SO₂, микрочастиц и ртути, а также сократить выбросы CO₂ от существующих электростанций и локальных котельных, работающих на угле.

Торфяные запасы обычно рассматриваются как источник низкокачественного топлива из-за высокого содержания влаги, низкой топливной эффективности. Торф содержит до 80 % влаги по массе, требуются существенные затраты энергии на сушку для удаления влаги, чтобы полностью сжигать топливо. По сравнению с низкокачественными углями, такими как бурый уголь, торфяное окускованное топливо содержит больше углерода, меньше серы и не содержит ртуть [8, 10].

Теплота сгорания торфяного топлива сравнима с теплотой сгорания бурых углей, что делает его потенциально альтернативным углю топливом для производства энергии в существующих угольных котлах путем совместного сжигания. В ряде случаев совместное сжигание торфа и угля требует незначительной технической модификации камеры сгорания [14].

Погрузочно-разгрузочные работы, измельчение, сушка и хранение угольного топлива определяют безусловно значительную часть загрязнения с точки зрения высокого уровня эмиссии угольных мелочей и пыли. При добыче угля и его обработке образуются огромные запасы угольных отходов. Угольные отвалы, как правило, находятся в форме влажного пирога, с которым трудно обращаться, хранить и транспортировать [5].

После переработки и обогащения около 15-20 % угля содержит мелочь размерами от порошка до мелких гранул. По большей части эти отходы неприменимы непосредственно, таким образом, остается значительное количество материала, который не используется и представляет опасную и дорогостоящую проблему при размещении. Соответственно, переработка угольных отходов, их хранение и размещение требуют значительных и непроизводительных затрат для промышленности.

Даже в смеси с товарным угольным продуктом мелочь может вызвать закупоривание и зависание в транспортных системах. При хранении в штабелях угольная пыль приводит к загрязнению поверхностного стока. Тепловая сушка угольной мелочи является предельно дорогой, продукт может



создавать повышенное пыление или даже опасность взрыва. Возможны значительные потери угольной мелочи при перевозках железнодорожным транспортом, что наносит вред окружающей среде на территориях, окружающих транспортные системы. Одним из вариантов решения проблем, связанных с угольными отходами, является гранулирование угольной мелочи. Известно, что использование связующих, таких как кукурузный крахмал, лигносульфонаты, эмульсии асфальта и лигноцеллюлоза, позволяет получать прочный конечный гранулированный продукт [4]. Метод гранулирования позволяет утилизировать отходы угольной промышленности и уменьшить потери этого источника энергии [7].

Существующие проблемы угольных отходов, увеличение спроса на уголь высокого качества, все более строгое выполнение природоохранных стандартов определяют необходимость новых исследований использования угольных отходов.

Гранулирование улучшает такие важные физико-механические параметры любого дисперсного продукта как текучесть, уменьшает пыление и спекание при сжигании из-за предоставления частицам необходимых формы и размера. Гранулирование применяется практически во всех отраслях промышленности. Гранулы, полученные из порошкообразных фракций, могут эффективно сжигаться.

Технология брикетирования угля ориентирована на агломерацию угольной мелочи при низких давлениях с использованием связующих, как правило каменноугольной смолы, чтобы скрепить отдельные частицы. Угольная мелочь влажностью 20-30 % характеризуется распределением размеров частиц и зольностью.

В сухом состоянии угольная мелочь обычно просеивается через сито 28 меш – размер, который может использоваться для гранулирования или брикетирования. В этом случае размеры соответствуют условиям производства пеллет, брикетов, брусков, блоков и других угольных агломератов со связующими при производстве составляющих бетона [6].

Однако большинство известных до настоящего времени связующих значительно увеличивают стоимость угольного восстановления, ограничивая использование этой технологии. Поэтому необходимы недорогие связующие и процесс гранулирования [17]. Положительные свойства гранул, такие как стабильность при транспортировке, высокая насыпная плотность, малое пыление определяют минимальные затраты процесса. С другой стороны, торф, добытый из торфяного месторождения, уже используется в качестве местного топлива [1].

Представляется экономически привлекательным использование торфа в существующих котельных с совместным сжиганием. Торф особенно интересен из-за его превосходных связующих свойств, что делает возможной комбинацию со всеми материалами. Основная цель этой работы – поиск комбинаций угольной мелочи с торфом без добавок и связующих для получения более устойчивых и связных гранул. Другая цель состоит в сокращении эмиссии двуокиси серы при сжигании угольно-торфяного топлива, увеличении эффективности процесса гранулирования и использовании недорогого торфяного топлива.

Представленная работа отражает изучение комбинаций угольной мелочи с торфом. При смешивании угольной мелочи с торфом получается гомогенная масса для гранулирования на обычном оборудовании с применением давления – жесткой экструзии. Угольная мелочь и торф смешивались при различной влажности для изучения эффекта на готовых гранулах. Материал затем агломерировался в гранулированный продукт.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовался слабоспекающийся уголь из Кузбасса и травяно-моховой торф из Республики Карелия. Степень разложения торфа Н-4 по шкале фон Поста. Торф использовался в качестве связующего материала из-за содержания в нем битумов и гуминовых веществ, которые действуют как связующее, кроме того, торф является возобновляемым источником энергии. Обычно в торфе содержится до 70 % летучих веществ и 57 % фиксированного углерода (без учета влаги и золы), тогда как у слабоспекающегося угля содержание углерода достигает 84 % и летучих веществ 40 %. Результаты технического и элементного анализа двух видов топлива показаны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики угля и торфа

Топливо	Теплота сгорания, кДж/кг	Влажность, %	Летучие вещества, %	Зола, %	Элементный состав, %				
					С	Н	N	O	S
Слабоспекающийся уголь	23,4	10,2	40,9	16,3	84,6	5,1	2,1	8,2	0,60
Травяно-моховой торф	12,8	76,2	70,0	6,5	57,4	6,0	1,4	35,1	0,14

Эксперименты проводились при следующих условиях. Угольно-торфяные гранулы имели цилиндрическую форму диаметром 16 мм и высотой 25 мм, давление экструзии составляло 40 МПа. В экспериментах на поршневом прессе усилие вытеснения регистрировалось как функция времени и движения поршня. Формование гранул длилось 10 с. Объемное соотношение угля и торфа в образцах составляло 1:2; 1:1 и 2:1.

Образец торфяного материала был перемешан вручную и помещался в полиэтиленовый пакет для экспериментов по грануляции. Из образцов торфа предварительно были удалены крупные древесные включения. Предварительное обезвоживание торфа осуществлялось на тканевом фильтр-прессе. Отсепарированный и обезвоженный торф был подвергнут механической обработке – истиранию. Истирание торфяного сырья выполнено в рамках предварительного механического диспергирования в лабораторном измельчителе для последующей экструзии.

В процессе подготовительных операций угольного сырья выполнялось его дробление и просеивание через сито 24 меш (0,707 мм) – размер, который может использоваться для гранулирования. Процедура перемешивания образцов угля и торфа проводилась до получения однородной смеси. После перемешивания смесь помещалась в поршневой пресс для получения гранул (рис.1).

Технология жесткой экструзии при утилизации угольной пыли характеризуется высокими значениями напряжения сдвига и давления, что позволяет перерабатывать угольную мелочь с низкой влажностью без дополнительных компонентов и меньшего количества шагов обработки. Экструзия угольно-торфяной смеси выполнялась на поршневом прессе диаметром 32 мм и длиной 300 мм, установленным на универсальной машине Zwick/Roell Z100 (рис.2). Продавливание смеси проводилось через фильеру с длиной калибрующей части 60 мм и диаметром 16 мм со скоростью 0,0125 м/с при температуре окружающей среды +20 °С.

Сушка полученных гранул проводилась на экспериментальной установке в неподвижном слое с постоянной скоростью воздуха и температуре +35 °С при атмосферном давлении. Воздух в сушильную камеру подавался электрическим тепловентилятором.

Сушильная камера высотой 300 мм и диаметром 85 мм была изолирована слоем минеральной ваты 10 мм и обернута алюминиевой фольгой для устранения радиальных температурных градиентов. Температура горячего воздуха в сушильной камере измерялась термометром с точностью ± 1 °С. Сушка проводилась при относительной влажности воздуха 30 %, атмосферном давлении 758 мм рт.ст. и температуре окружающего воздуха +23 °С.

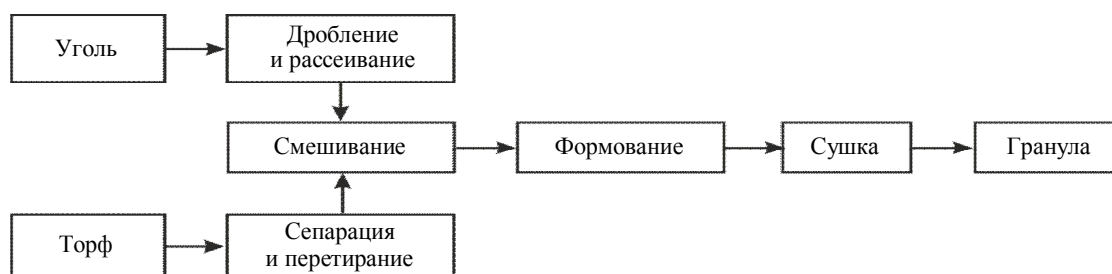


Рис.1. Последовательность эксперимента при получении гранул

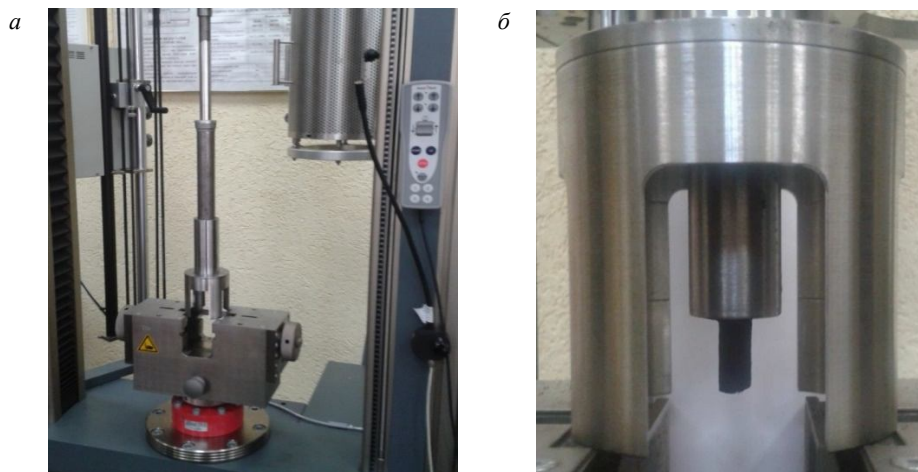


Рис.2. Экспериментальная установки на универсальной машине Zwick/Roell Z100 (а) и процесс грануляции (б)

Влажные гранулы укладывались в кассету, которая подвешивалась внутри сушильной камеры на высоте 100 мм от выходного сопла тепловентилятора. Площадь кассеты равна 0,08 м². Масса гранул перед сушкой, а также масса кассеты определялись при помощи лабораторных весов ВЛКТ-500 с точностью $\pm 0,01$ г.

Механическая прочность композитных образцов топлива определялись при осевом сжатии. Определение прочности образцов проводилось на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 со скоростью сжатия 0,1 м/мин.

Фиксация нагрузки, воздействующей на образец, и деформация, возникающая в образцах, проводились автоматическим способом. Тесты на механическую устойчивость включали измерение механического ресурса прочности при десятикратном падении образцов с высоты 2 м на бетонный пол. При оценке физико-механических свойств гранул определялись их размеры, плотность, прочность в соответствии с ГОСТ 54248-2010.

Результаты. Заключительная цель работы состоит в определении наиболее востребованных условий предварительной переработки угольной пыли при совместном сжигании с торфом в качестве связующего. Согласно теории связывания связующая сила является суммой физического и механического связывания, главным образом механического, а также результатом механической комбинации, когда связующее входит во внутреннее пространство вещества [3]. Торф как связующее выступает в качестве натурального органического полимера. Торф обладает свойствами высокой поверхностной активности, зависящей от его дисперсности.

Присутствие мелких коллоидных частиц способствует процессу уплотнения торфа. Из факторов группового состава наибольшее влияние на прочность гранул оказывают гуминовые кислоты и легкогидролизуемые соединения (рис.3).

В процессе получения смесь торфа и угля гранулируется, гранулы высушиваются в форме, пригодной для дальнейшего использования. Основным компонентом в процессе гранулирования является торф, состоящий из битумов, гуминовых веществ, волокна целлюлозы и лигнина. Эти компоненты придают торфу специальные характеристики связующего материала. Групповой состав органического вещества торфа, %: битумы – 7,3; водорастворимые и легкогидролизуемые вещества – 33,7; гуминовые кислоты – 26,1; фульвовые кислоты – 16,3; целлюлоза – 6,2; лигнин – 9,2.

Присутствие в торфе натуральных связующих уменьшает содержание серы и остаточную зольность гранул. Преимущество материалов из торфа заключается в низком содержании серы и понижении эмиссии NO_x.

Основные функциональные компоненты гуминовых веществ, включая битумы, гуминовые и фульвовые кислоты, позволяют обеспечить достаточную прочность влажных и сухих гранул [18]. Содержание гуминовых кислот более 15 % и битумов более 3-4 % повышает ингибирующие и консолидирующие способности торфяных связующих. Наблюдается улучшение реологических и структурно-механических свойств смеси. Структурообразование и плотность в свою очередь зависят от степени механической переработки материала и технологических параметров процессов формирования и сушки, оказывают существенное влияние на прочность топливных гранул. В табл.2 показаны параметры цилиндрических гранул.



Рис.3. Экспериментальные угле-торфяные гранулы (влажность 25%)

Таблица 2

Параметры цилиндрических композитных гранул

Объемное соотношение уголь:торф	Среднее значение (влажные гранулы)					Среднее значение (сухие гранулы)					
	Диаметр, мм	Длина, мм	Объем, м ³ ·10 ⁻⁶	Влажность, %	Масса, г	Диаметр, мм	Длина, мм	Масса, г	Объем, м ³ ·10 ⁻⁶	Плотность, кг/м ³	Усадка, %
2:1	16,0	25,0	5,026	34,4	6,14	15,5	24,0	4,18	4,54	922	9,73
1:1	16,0	25,0	5,026	49,7	7,24	14,9	22,8	3,23	3,98	812	20,81
1:2	16,0	25,0	5,026	60,5	8,14	14,3	20,3	2,48	3,26	761	35,07

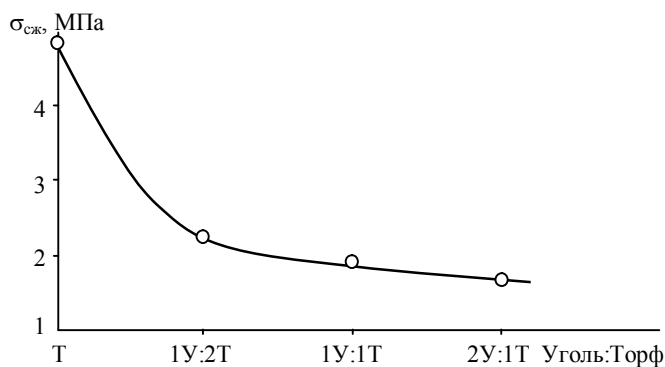


Рис.4. Предел прочности на сжатие угольно-торфяных гранул

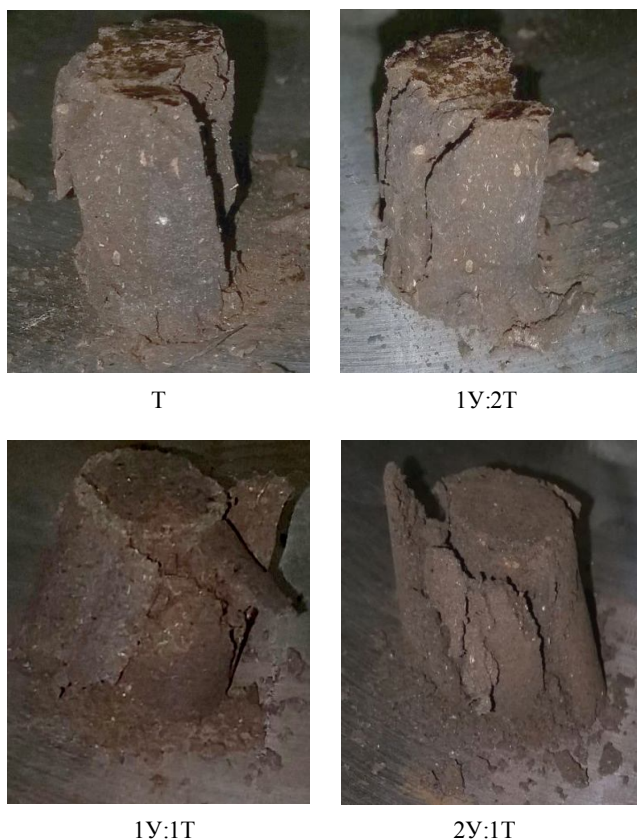


Рис.5. Характер разрушения гранул при осевом сжатии

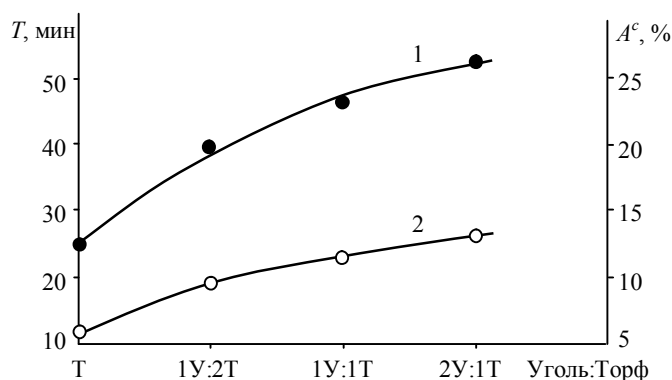


Рис.6. Время сгорания гранул (1) и содержание золы после сгорания (2)

Органические функциональные компоненты торфа химически адсорбируются на поверхности угольных частиц, увеличивая прочность гранул. Комплекс тестов, показывающих характеристики гранул:

- Исследования показали, что угольно-торфяные гранулы обладают достаточной механической прочностью. В сухом состоянии предел прочности на сжатие составляет 1,15-1,63 МПа. Прочность гранул при сжатии уменьшается с увеличением угольной пыли в композиции (рис. 4, 5).

- Испытания на механическую прочность (крошимость) гранул проводилось методом десятикратного сбрасывания гранул с высоты 2 м на бетонный пол с оценкой крошимости гранул. Механическая прочность цилиндрических гранул составила 96,5 % [7]. Для торфяных пеллет механическая прочность находится в пределах 95 % [11].

Сжигание гранулированного топлива с образованием зольного остатка проводилось в лабораторной печи СНОЛ 7,2/1100 при температуре 800 °С. Совместное сжигание угольно-торфяной смеси отличается низкими скоростью золообразования и точкой плавления [12]. Составы золы вообще подобны, но торф содержит относительно более низкое количество SiO_2 и Al_2O_3 и более высокие концентрации CaO и MgO [12]. Скорость золообразования при сжигании угля и торфа понижается с увеличением доли торфа (рис.6). Это может привести к пониженным требованиям к золоудалению.

Прямое сжигание угля и торфа в одном котле является наиболее простой и широко применяемой технологией совместного сжигания. При сжигании торфяного топлива в угольных котлах могут возникать некоторые технические проблемы в зависимости от типа котла. Прямое сжигание проводилось в котле с механической подачей топлива (рис.7).

В котле с механической подачей топливо подается на подвижную колосниковую решетку, в то время как воздух проходит через постель топлива. Мелкие частицы топлива сгорают выше решетки, в то время как крупные частицы сгорают на решетке при перемещении топлива от задней до фронтальной части котла. Котлы с механической подачей топлива способны к сжиганию крупных частиц, но длиной менее 3 см; ограничены максимальной мощностью приблизительно 20 МВт и позволяют сжигать широкий спектр твердого топлива, включая уголь, древесину, отходы, торф. Котел может функционировать даже на довольно сыром топливе переменных размеров, но с ограничением по количеству пыли в топливе [16].

Закключение. Исследование было сосредоточено на оценке возможности утилизации угольной мелочи путем гранулирования с натуральным торфом. Топливные гранулы были подготовлены на основе угля и торфа в качестве основных компонентов. Комплекс исследований показал возможность получения гранулированных топливных составов методом экструзии. Результаты показывают, что лучший состав гранул и условия процесса гранулирования достигаются при соотношении угля и торфа 1:1 при достаточной стабильности получаемых гранул. Органические функциональные компоненты торфа химически адсорбируются на поверхности угольных частиц, увеличивая прочность гранул. Механическая прочность гранул снижается с увеличением в смеси угольной пыли, но позволяет увеличивать время горения топлива.

Гранулы, состоящие из двух видов топлива – угольная пыль и торф, обеспечивают горение в слое на наклонно-переталкивающей колосниковой решетке. Угольно-торфяные гранулы обладают достаточной механической прочностью при транспортировке топлива и механической подаче в котел.

Коммерциализация технологии гранулирования угольной мелочи должна доказать экономику процесса и потенциал сокращения эмиссии от сжигания угольно-торфяного топлива, чтобы оправдать продолжение исследований гранулирования топливного сырья с использованием торфа. Оборудование и технология жесткой экструзии позволяют производить гранулы, имеющие высокую прочность.

Проведенные предварительные исследования показали перспективу утилизации угольных отходов методом гранулирования с торфом. Дальнейшее исследование позволит проанализировать угольно-торфяные гранулы с оценкой их сгорания, эмиссии в атмосферу и сопротивления намоканию, определяемого как время, требуемое для разрушения топлива в водной среде.

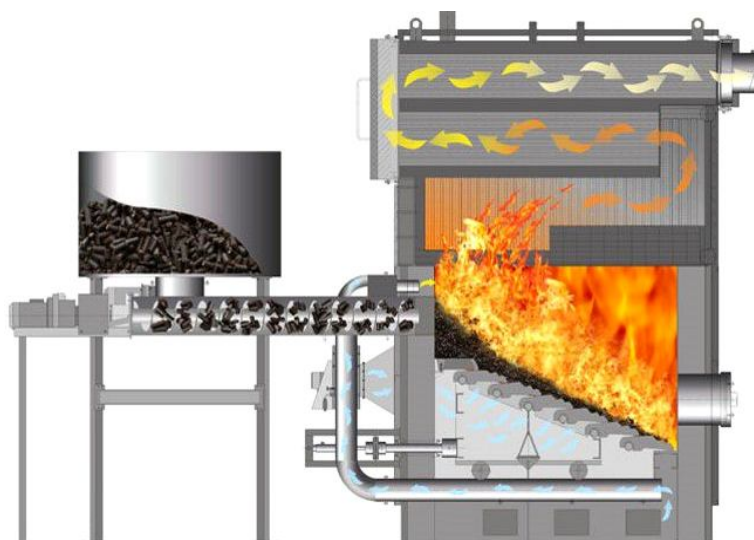


Рис. 7. Сжигание топлива на наклонно-переталкивающей колосниковой решетке

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования к торфяному сырью для производства окускованного топлива / А.В.Михайлов, А.В.Большунов, Э.А.Кремчев, К.В.Епифанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 4. С.59-63.
2. Biopact. Canadian researchers study co-firing of peat and biomass with coal. URL:<http://news.mongabay.com/bio-energy/2007/12/canadian-researchers-study-co-firingof.html> (дата обращения апрель 2016).
3. Briquette Binder Products. URL:<http://www.humicacidcn.com/PRODUCTS/ShowArticle.asp?ArticleID=71> (дата обращения апрель 2016).
4. Kelly John, Woodworth Robert, Namazian Mehdi, Miller George. Reconstitution of Beneficiated Coal Using the BioBinder process. Proceedings of Tenth Annual Coal Preparation, Utilization, and Environmental Control Contractors Conference. Pittsburgh, Pennsylvania. 1994. Vol.I, p.25-34.
5. Cooper M. et al. Research and Development for Storage, Transport and Handling of Coal-Based Fuels. Proceedings of the Sixth Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors Conference. August 6-9, 1990, p.26-34.
6. Donald H. White, Pelletizing and briquetting of coal fines using binders produced by liquefaction of biomass. U.S. Patent 5916826 A. June 29. 1999.
7. Gholipour Zanjani N., Zarringhalam Moghaddam A., Dorosti S. Physical and chemical properties of coal briquettes from biomass-bituminous blends. Petroleum & Coal. 2014. 56(2), p.188-195.
8. Hupa M. Interaction of fuels in co-firing in FBC. Fuel; 2005. 84, p.1312-1319.
9. Kelly John, Miller George, Namazian Mehdi. A Low Cost and High Quality Solid Fuel From Biomass and Coal Fines. Final Report DOE Contract No. DE-AC26-99FT40157. July 2001. URL:<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/795777> (дата обращения апрель 2016).
10. Orjala M., Ingalsuo R. Sulphur dioxide reduction in co-firing of peat and wood in fluidized bed boilers. 5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment. 1999. 12(15), p.685-689.
11. Quality guidelines for fuel peat: fuel classification and quality assurance, sampling and analysis of properties. NT Envir. 009, Nordic Innovation Centre, Approved 2005-11, p.24.
12. Shao Yuanyuan. Investigation of Ash Deposition During Co-Firing Biomass/Peat with Coal in a Pilot-Scale Fluidized-Bed Reactor. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2011, p.108.



13. *Sudol S.* Peat Fuel – A Clean Solution to Northwestern Ontario's Energy Crisis. INORD Commentary. <http://inord.laurentian.ca/commentaries.htm>. (дата обращения апрель 2016).
14. *Telford P.G.* Peat fuel – a sustainable bioenergy resource. IASTED International Conference Environmental Management and Engineering (EME 2009). Banff, Canada, July 7-8. 2009, p.6-10.
15. *Theis M., Skrifvars B.J., Hupa M., Tran H.* Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1. Deposition rates. *Fuel*. 2006. 85(7-8), p.1125-1130.
16. *Van Loo S, Koppejan J.* Handbook of biomass combustion and co-firing. London, UK, Earthscan, 2008, p.442.
17. *Woodworth R., Kelly J., Namazian M., Miller G.* Biobinder process for reconstitution of fine coal. URL: http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/96/96jpfs/jpfs_pdf/biofuel.pdf (дата обращения апрель 2016).
18. You-lian Zhou, Yuan-bo Zhang, Bing-bing Liu, Guang-hui Li, Tao Jiang. Effect of modified humic acid binder on pelletisation of specularite concentrates. *Journal of Central South University*. April 2015. Vol.22. Is.4, p.1247-1255.

Автор А.В.Михайлов, д-р. техн. наук, профессор, ers68@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 25.05.2016.