

ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ АНТРАЦИТОВЫХ ШТЫБОВ В ТОПКАХ КОТЛОВ С «ПОЛУКИПЯЩИМ» СЛОЕМ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Д.В. Селезнёв¹, О.Ю. Милованов¹, Е.В. Кариб¹,
С.Н. Кузьмин¹, Р.Л. Исьёмин²

*Кафедра «Гидравлика и теплотехника» (1); Научно-образовательный центр «Региональных проблем развития автономной энергетики на базе переработки и утилизации техногенных образований и отходов» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»;
admin@ido.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: агломераты; воздухораспределительная решетка; выбросы; дорогостоящие угли; кипящий слой; сульфаты.

Аннотация: Рассмотрен процесс сжигания антрацитового штыва в топках котлов с полукипящим слоем. В ходе сжигания в данной топке было получено наименьшее количество выбросов, что благоприятно сказывается на экологической составляющей.

Введение. Одним из путей снижения издержек в коммунальной энергетике является замена дорогого топлива на более дешевое. Отходы углеобогащительных фабрик (штыв, шлам и др.) загрязняют окружающую среду и не используются в качестве топлива для коммунальных котельных, которые работают на дорогостоящих сортах углей: стоимость угля марок Тр – 800–1050 р./т, ДГр – до 1150 р./т, антрацита АС – 4611–5314 р./т, антрацита АМ – 1347–1460 р./т, антрацита АК – до 2930 р./т. Так, антрацитовый штыв (АШ) при относительно низкой цене 600–620 р./т имеет достаточно высокую теплоту сгорания 19...21 МДж/кг. Использование АШ вместо угля ДГр (теплота сгорания 18,5 МДж/кг) сократит затраты на топливо на 27 %, вместо угля Тр (24,1 МДж/кг) – на 12 %, вместо антрацита АС (25,5 МДж/кг) – на 36 %. Однако АШ трудно сжигать в топках котлов, оборудованных стандартными чугунными колосниковыми решетками с большой долей «живого» сечения, которые при сжигании антрацитов к тому же быстро выходят из строя.

Неудачными были попытки сжигания АШ в высокотемпературном кипящем слое при температуре выше температуры плавления золы на движущейся цепной решетке в топке ТНУ по технологии «Игнифлюид» [1, с. 214–215], которые принимались на угольных предприятиях Ростовской области (Россия). Невозможно было подобрать оптимальную скорость подачи и напор дутьевого воздуха: штыв либо уносился из топки, либо ожигание штыва прекращалось, а горение штыва в плотном слое было малоэффективным. При реализации данной технологии потери теплоты от механической неполноты сгорания не должны превышать 5 %, а при сжигании АШ эти потери превышают 20 %. В топках ТНУ высок проскок несгоревшего топлива в шлаковый бункер, содержимое которого имеет зольность не выше 60 %.

Технология «Игнифлюид» предназначалась для сжигания углей с низкой теплотворной способностью (не выше 18 МДж/кг) и зольностью до 20 % [2, с. 61–62], а зольность АШ – выше 30 %. При горении на поверхности частиц таких углей возникает оплавленная зольная воздухонепроницаемая оболочка, которая препятствует продолжению процесса горения. Причиной значительных потерь топлива со шлаком и с уносом могут быть образующиеся в кипящем слое зоны локального фонтанирования, нарушающие однородность структуры кипящего слоя. Из-за этих зон время пребывания и полнота окисления разных частиц топлива в кипящем слое становятся неодинаковыми.

Методика эксперимента. Проведенные исследования [3] движения частиц в кипящем слое показали, что если подавать воздух под центр слоя топлива с большей массовой скоростью, а под периферийные области слоя – с меньшей, то ликвидировать зоны локального фонтанирования можно, увеличивая скорость воздуха и уменьшая начальную высоту слоя, что особо выгодно для котлов малой теплопроизводительности, которые должны иметь небольшие габариты. При этом доля «живого» сечения воздухораспределительной решетки должна быть минимально возможной, так как в этом случае зольная оболочка, образующаяся на поверхности частицы АШ при ее горении, получается воздухопроницаемой [4, с. 76].

Нами было предложено осуществлять сжигание АШ на непрямой решетке, расположенной в нижней части горизонтальной жаровой трубы (рис. 1).

Воздух вводится в виде двух встречных рядов струй, наклоненных к центру топки под острым углом. Это предотвращает попадание частиц топлива в отверстия для ввода воздуха. Отверстия для ввода воздуха расположены на боковой полке двух швеллеров, приваренных по образующим к жаровой трубе. Сверху каждый из этих швеллеров прикрыт вторым водоохлаждаемым швеллером меньшего размера. Схема такой жаровой трубы с топкой изображена на рис. 2. Конструкция котла, оборудованного такой топкой, защищена евразийским патентом № 006130 от 27 октября 2005 г.

Само сжигание АШ осуществляется в полукипящем слое: мелкие частицы «кипят» в промежутках между образующимися при горении топлива шлаковыми агломератами.

Результаты и обсуждение. Для проверки предложенной конструкции решетки проводились исследования в модельной топке. Было проведено несколько балансовых опытов по стандартным методикам [5], при этом в качестве топлива использовался рядовой антрацит (табл. 1). Средний выход летучих веществ составил 8,8 %, а средняя теплотворная способность – 25,2 МДж/кг. В результате опытов было установлено, что потери теплоты от механической

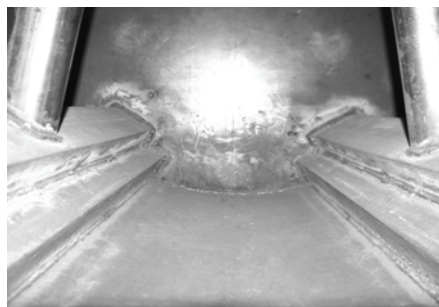


Рис. 1. Топка котла КВр

Рис. 2. Поперечный разрез топки и жаровой трубы котла:

1 – жаровая труба; 2 – кипящий слой твердого топлива; 3 – направления циркуляции частиц топлива в кипящем слое; 4 – водоохлаждаемый узел подачи дутьевого воздуха под слой топлива; 5 – нагреваемая в котле вода; 6 – трубы для удаления дымовых газов из топки (дымогарные трубы первого хода)

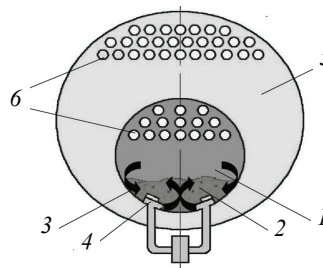


Таблица 1

Фракционный состав антрацита, %

Размер частиц, мм	Доля фракции в общем объеме антрацита	Зольность	Влажность	Сера	Азот
До 1	8,3	30	3,8	0,4	1,1
1...2	14,5	25	3,5	0,5	1,1
2...3	29,0	22	2,5	0,4	1,15
3...7	8,9	25	2,5	0,4	1
7...13	24,4	21	2,5	0,4	1
13...25	12,4	10	2,6	0,35	0,9
25...50	2,5	1,6	2,6	0,35	1,2

неполноты сгорания составили 10,5...11,4 %, от химической неполноты сгорания – 0,05...0,06 %, то есть КПД составил 88,54...89,45 % при коэффициенте избытка воздуха α за котлом 0,98...1,48 и содержании соединений серы в дымовых газах в количестве 1200...1600 мг/м³ и азота – 550...680 мг/м³. Указанные концентрации соединений серы и азота приведены к нормальным физическим условиям и коэффициенту $\alpha = 1$.

В ходе опытов содержание окислов серы, азота, окиси углерода, двуокиси углерода и содержание кислорода определялись за котлом с помощью газоанализатора «Газотест». Потери топлива с уносом составили всего 2,2...2,7 %. Унос состоял на 65 % из частиц размером менее 0,5 мм (зольность 47 %), на 10 % – 0,5...1 мм (зольность 22 %), на 28 % – 1...2 мм (зольность 20 %) и более крупных частиц размером до 5 мм (зольность 20...25 %).

Состав золы от сжигания рядового антрацита (на безсульфатную массу) был следующим: SiO₂ – 52 %, Al₂O₃ – 22 %, Fe₂O₃ – 15 %, CaO – 4 %, MgO – 2 %, K₂O₃ – 3,5 %, Na₂O₅ – 1,5 %. Степень связывания серы карбонатной частью золы составила 57...73,3 %. При этом в самой золе и шлаковых агломератах содержалось 0,06...0,36 % серы. Максимальная концентрация серосодержащих веществ наблюдалась в тех мельчайших частицах, которые образовывали зольные отложения на верхней части жаровой трубы. Здесь концентрация серосодержащих веществ доходила до 174,93...228,44 г/кг. Причиной такого распределения серы, уловленной золой и шлаком, являются температурные режимы, в которых происходит взаимодействие образующейся при окислении серы SO₂ с карбонатной частью золы в разных частях котла. В полужидком слое под воздействием высокой температуры (~1860 °С) карбонаты, содержащиеся в золе, разлагаются с образованием окиси кальция, далее образуется сульфит кальция – CaSO₃ с последующим его окислением в сульфат кальция – CaSO₄. Однако при высокой температуре возможно и разложение образующегося сульфата кальция, что обуславливает низкое содержание сульфатов в золе и шлаке, удаленных из полужидкого слоя. Выше полужидкого слоя температура постепенно понижается от 1100 °С непосредственно над слоем до 900 °С в верхней части жаровой трубы. Такая температура оптимальна для протекания реакций [6, с. 126], что определяет высокую концентрацию серосодержащих веществ в зольных отложениях в верхней части жаровой трубы. В этой же зоне некоторое время находятся мелкие кусочки золы и шлака, которые выбрасываются в надслоевое пространство, а затем удаляются из топки. Это объясняет повышенную концентрацию серы в мелких частицах золы и шлака,

удаляемых из топки. Интересно, что на поверхности труб конвективного пучка зольные отложения содержали только 18,93 г/кг сульфатов. Эти отложения находились в зоне температур 200...600 °С, где реакции протекают медленно [6, с. 123]. Причем, содержание карбонатов в зольных отложениях на верхней части жаровой трубы и на трубах конвективного пучка было практически одинаково (18 и 18,9 г/кг соответственно), что говорит о том, что реакции в зоне труб конвективного пучка почти не идут, а сульфаты, содержащиеся в этих отложениях, попадали сюда вместе с частицами золы, уносимыми из жаровой трубы.

Сжигаемый рядовой антрацит имел довольно высокое содержание азота. Известно, что 1 % азота в топливе при 100 % превращении в окись азота соответствует ее концентрации в дымовых газах около 1500 мг/м³ [6]. Относительно низкие концентрации окислов азота при сжигании рядового антрацита в полукипящем слое могут быть объяснены частичным восстановлением окислов азота углеродом коксового остатка в слое и углесодержащих частиц в надслоевом пространстве [6, с. 134].

Для сжигания АШ в коммунальных котельных предложены жаротрубно-дымогарные котлы, характеристики которых представлены в табл. 2.

При испытаниях котла сжигался АШ следующего гранулометрического состава: фракция размером 0...1 мм составила 24,7 %; 1...3 мм – 38,9 %; 3...6 мм – 21,1 % и остаток на сите – 15,3 %. Эти фракции имели зольность 30; 26,2; 26,3 и 31,1 % и содержали серу в количестве 1,26; 1,21; 1,22 и 1,38 % соответственно. Среднефракционная влажность была 9 %, выход летучих веществ – 6 %, низшая теплотворная способность – 20,6 МДж/кг. Химический состав золы был следующим: SiO₂ – 50,5 %; Al₂O₃ – 22,64 %; TiO₂ – 0,06 %; P₂O₅ – 0,19 %; SO₃ – 4,56 %; Fe₂O₃ – 10%; CaO – 4,14 %; MgO – 1,74 %; Na₂O – 0,86 %; Mn₃O₅ – 0,12 %; K₂O – 3,36 %, то есть был близким к химическому составу рядового антрацита, опыты по сжиганию которого были описаны выше.

Таблица 2

Технические характеристики котлов КВр

Характеристика	Котлы с номинальной теплопроизводительностью, кВт			
	200	300	500	800
Температура воды на выходе из котла (максимальная) при давлении воды в котле до 0,35 МПа, °С	95			
Максимальное рабочее избыточное давление воды в котле, МПа	0,4			
Площадь поверхности нагрева котла, м ²	21,77	33,0	45,0	60,0
	радиационная 6,27	7,4	7,9	9,15
	конвективная 15,5	25,6	37,1	50,85
КПД котла, %, не ниже	75,0			
Класс котла	Второй			
Габариты котла, мм	2000 × ×1800 × × 2200	2584 × ×1800 × ×2200	2584 × ×1900 × ×2500	3700 × ×2000 × ×2500

В ходе балансовых испытаний котла было установлено, что он развивает номинальную теплопроизводительность, а его КПД равен 83,03...84,93 %, причем потери теплоты составили: с уходящими газами – 6,77...7,65 %; от химической неполноты сгорания – 0,16...0,36 %; от механической – 1,93...2,04 %; с физическим теплом шлака – 0,87...0,93 %; из-за уноса топлива – 4...4,84 %; в окружающую среду – 1,15...1,32 %. Содержание окислов серы в дымовых газах было 83,3...97,5 мг/м³, а окислов азота – 436,9...635,4 мг/м³. Такой состав дымовых газов говорит о 90 % улавливании окислов серы за счет карбонатной части золы.

Наши котлы теперь работают в котельных г. Гуково, Донецка, Новошахтинска, Тарасовский Ростовской области, где сжигается не только АШ, но и угольный шлак. В заключение заметим, что кроме АШ в наших котлах можно сжигать штыбы каменных длиннопламенных углей, а также шлак от обогащения этих углей.

Выводы. В ходе проведения испытания по сжиганию антрацитового штыба в топках котлов «полукипящего» слоя было выявлено:

- снижение выбросов окислов серы, азота, окиси углерода, двуокиси углерода;
- уменьшение содержания карбонатов в зольных отложениях на верхней части жаровой трубы и на трубах конвективного пучка;
- уменьшение потерь с уходящими газами в окружающую среду, от химической неполноты сгорания, от механической теплоты сгорания.

Список литературы

1. Сыромятников, Н.И. Процессы в кипящем слое / Н.И. Сыромятников, В.Ф. Волков. – Свердловск : Metallurgizdat – 1959. – 248 с.
2. Кубин, М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое / М. Кубин ; пер. с чеш. под ред. В.Р. Котлера. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 112 с.
3. Исьемин, Р.Л. Влияние на циркуляцию частиц в псевдооживленном слое погруженного тела и неравномерного газораспределения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Р.Л. Исьемин. – М., 1993. – 22 с.
4. Шретер, В.Н. Паровые котлы / В.Н. Шретер. – М. ; Л. : ГОНТИ, 1938. – 420 с.
5. Трёмбовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
6. Бородуля, В.А. Сжигание твердого топлива в псевдооживленном слое / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов. – Минск : Наука и техника, 1980. – 192 с.
7. World Sustainable Energy Days 2011. – URL : www.wsed.at.
8. European Pellet Conference 2011. – URL : <http://www.wsed.at/en/programme/european-pellet-conference>.

Technology for Anthracite Culm Burning in Chamber Furnace with Semi-Boiling Layer. Environmental and Economic Aspects

**D.V. Seleznev¹, O.Yu. Milovanov¹, E.V. Karib¹,
S.N. Kuzmin¹, R.L. Isyomin²**

*Department “Hydraulics and Heat Engineering”(1), Research and Education Center
“Regional Problems of Development Autonomous Power Engineering on the Basis
of Processing and Utilization of Manmade Structures and Waste” (2), TSTU;
admin@ido.tstu.ru*

Key words and phrases: agglomerates; air-distributing lattice; discharge; expensive coals; fluidized bed; sulphates.

Abstract: The article considers the process of anthracite culm burning in furnace chambers with a semi-boiling layer. During burning in the given furnace chamber the least quantity of emissions was produced, that favorably affects the ecological component.

**Technologie der Verbrennung der Antrazitkohlegrusen
in den Feuerungen der Kesseln mit der “halbsiedenden” Schicht,
ökologische und ökonomische Aspekte dieser Maßnahme**

Zusammenfassung: Es wird das Prozess der Verbrennung des Antrazitgruses in den Feuerungen der Kesseln mit der halbsiedenden Schicht betrachtet. Während der Verbrennung in dieser Feuerung wurde die kleinste Menge der Emissionen erhalten, was sehr gut für die Ökologie ist.

**Technologie de la combustion des braises anthraciteuses de charbon dans
les foyers des chaudières avec une couche “semi-bouillante”, aspects
écologiques et économiques de cette mesure**

Résumé: Est examiné le processus de la combustion des braises anthraciteuses de charbon dans les foyers des chaudières avec une couche “semi-bouillante”. Lors de la combustion dans ce foyer a été reçue la moindre quantité de jets, ce qui se fait bien sentir sur la composante écologique.

Авторы: *Селезнёв Денис Владимирович* – магистрант; *Милованов Олег Юрьевич* – магистрант; *Кариб Екатерина Викторовна* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Гидравлика и теплотехника»; *Кузьмин Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и теплотехника»; *Исьёмин Рафаил Львович* – кандидат технических наук, директор НОЦ «Региональных проблем развития автономной энергетики на базе переработки и утилизации техногенных образований и отходов», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика и теплотехника», проректор по социально-воспитательной работе, ГОУ ВПО «ТГТУ».
