

УДК 621.18-66

**МИХАЛЕВ А.В., КУЗЬМИН С.Н., ИСЬЕМИН Р.Л.,
КОНЯХИН В.В., КРАСАВЦЕВ Б.Е., ЗОРИН А.Т.***Тамбовский государственный технический университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСЖИГАНИЯ АНТРАЦИТОВОГО ШТЫБА И БИОГРАНУЛ В ОТОПИТЕЛЬНОМ КОТЛЕ С ТОПКОЙ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Досліджено швидкість згорання низькосортного антрациту, гранул та лузги соняшника і гранул з деревних відходів, а також їх сумішей, що містять від 40 до 60% цього та іншого палива у високотемпературному киплячому шарі у діючому опалювальному котлі. Показано, що заміна частин антрацитового відсіву на біогранули різко підвищує швидкість згорання паливної суміші, проте при цьому збільшується емісія в атмосферу окису вуглецю та двоокису азоту. Визначено оптимальний склад паливної суміші, яка дає кращі екологічні та економічні результати.

Исследована скорость горения низкосортного антрацита, гранул из лузги подсолнечника и гранул из древесных отходов, а также их смесей, содержащих от 40 до 60 % того и другого топлива в высокотемпературном кипящем слое в действующем отопительном котле. Показано, что замена части антрацитового отсева на биогранулы резко повышает скорость горения топливной смеси, однако при этом увеличивается эмиссия в атмосферу окиси углерода и двуокиси азота. Определен оптимальный состав топливной смеси, который дает лучшие экологические и экономические результаты.

Speed of burning of low-grade anthracite, pellets from husk sunflower and pellets from wood waste products, and also their mixes containing from 40 up to 60 % of that and other fuel in high-temperature fluidized bed in the working heating boiler is investigated. It is shown, that replacement of a part on low-grade anthracite on pellets sharply raises speed of burning of a fuel mix, however thus issue in an atmosphere CO and dioxide of nitrogen increases. The optimum structure of a fuel mix which gives the best ecological and economic results is determined.

Целью настоящей работы является повышение эффективности использования низкосортных углей в коммунальной энергетике при одновременном улучшении экологических характеристик работы угольных коммунальных котельных.

Последнее время российские предприятия коммунальной энергетики начинают испытывать дефицит качественных углей при достаточно высоких темпах роста добычи угля. Вместе с тем, угольная промышленность России ежегодно вырабатывает миллионы тонн углей низкого качества (штыбов, “семечко” со штыбом), а также угольных шламов, которые имеют относительно низкую стоимость, менее востребованы, чем качественные угли, и имеют теплоту сгорания, приемлемую для их использования в коммунальной энергетике. Под штыбом (Ш) здесь понимается уголь с размерами частиц больше 0, но меньше 6 мм, под “семечко” со штыбом (СШ) – уголь с размерами частиц от 0 до 12...13 мм.

Для сжигания углей Ш и СШ нами разработан стальной водогрейный жаротрубно–дымогарный

котел [1], оборудованный топкой с высокотемпературным кипящим слоем, который формируется, в отличие от известных конструкций [2–4], на неподвижной воздухораспределительной решетке. Котел выпускается в трех модификациях теплопроизводительностью от 300 до 800 кВт.

Более 80 котлов нашей конструкции с 2003 г. успешно эксплуатируются на предприятиях коммунальной энергетики Ростовской области, причем за счет сжигания в этих котлах антрацитовых углей Ш и СШ, а не дорогостоящих антрацитов, себестоимость вырабатываемого котельными тепла снизилась на 25 %.

При сжигании угля необходимо также минимизировать выбросы окислов серы, азота и, в связи с вступлением в силу Киотского протокола, двуокиси углерода. Сама по себе технология сжигания угля в высокотемпературном кипящем слое не дает этого сделать. Для уменьшения выбросов указанных веществ в атмосферу нами предложено в топке с высокотемпературным кипящим слоем совместно

сжигать низкосортный уголь и биомассу в виде биогранул.

В известных нам работах чаще всего исследуется влияние совместного сжигания в циркулирующем кипящем слое [5] или в кипящем слое с барботажем газовых пузырей, но при температуре в слое ниже температуры плавления золы [6] только на величину выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а не сам процесс горения топливной смеси. Представленная статья является попыткой восполнения указанного пробела.

На действующих котлах нашей конструкции была проведена серия опытов по исследованию процессов совместного сжигания углей СШ и АШ с гранулами из лузги подсолнечника и гранулами из древесных отходов соответственно.

Сжигаемое топливо имело следующие характеристики:

СШ: влажность 3,8 %, зольность 3,7 %, выход летучих веществ 2,4 %, теплота сгорания (по бомбе) 31,82 МДж/кг, содержание серы (общей) 0,7 %, содержание азота 0,7 %;

АШ: влажность 9,0 %, зольность 27,9 %, выход летучих веществ 6 %, теплота сгорания (по бомбе) 18,0 МДж/кг, содержание серы (общей) 2,0 %, содержание азота 0,66 %;

Гранулы из лузги подсолнечника: влажность (производство ООО “Южный полюс”, г. Кропоткин, Краснодарский край) 7,7 %, зольность 5,4 %, выход летучих веществ 67,9 %, теплота сгорания (по бомбе) 18,46 МДж/кг, содержание серы (общей) 0,1 %, содержание азота 0,7 %;

Древесные гранулы: влажность (производство ОАО “Биотопливо”, г. Санкт – Петербург) – 8 %, зольность – 0,5 %, выход летучих веществ – 80 %, теплота сгорания (по бомбе) – 20,7 МДж/кг, содержание серы (общей) – 0,1 %, содержание азота – 0,1 %.

Перед началом опытов готовились порции топлива, состоящие на 100 % из угля; на 100 % из гранул; на 60 % из угля и на 40 % из гранул, на 40 % из угля и на 60 % из гранул.

Котел работал в номинальном режиме, при этом в его топке поочередно сжигались порции топлива указанного выше состава. Через каждые 60 секунд с помощью газоанализатора “Газотест” определялось и регистрировалось содержание в уходящих газах кислорода, двуокиси углерода,

окси углерода, двуокиси азота и двуокиси серы. Одновременно с этим определялась и регистрировалась температура дымовых газов за дымогарными трубами первого хода с помощью прибора “Center – 306”. Полученные данные обрабатывались, в том числе концентрации CO_2 , CO , NO_2 , SO_2 пересчитывались к нормальным физическим условиям (температура $^\circ\text{C}$, коэффициент избытка воздуха 1).

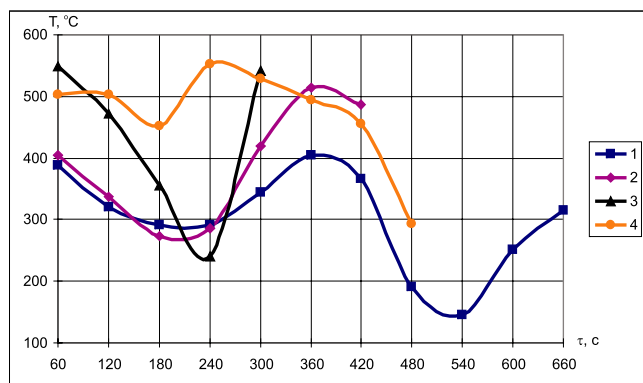
По изменению химического состава и температуры дымовых газов можно было оценить протекание процесса воспламенения и горения порции различных топлив [6].

Как следует из рис. 1а (кривая 1), при сжигании только угля СШ после загрузки в топку порции топлива температура в слое топлива и, соответственно, температура газов за дымогарными трубами первого хода падает. Хотя топливо интенсивно горит, о чем свидетельствует снижение (на 0,032 % в секунду) и последующий рост (на 0,007 % в секунду) концентрации кислорода в уходящих газах (кривая 1, рис. 1б). Скорость изменения концентрации кислорода в дымовых газах определялась расчетным путем.

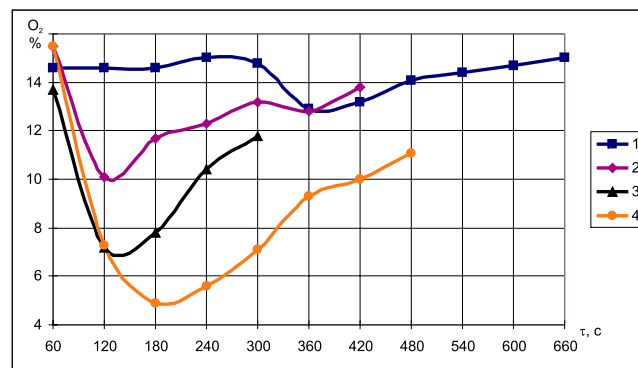
Концентрация CO в дымовых газах составляет в среднем 1533,6 мг/м³ и только в момент времени, следующий сразу за забросом топлива, повышается до 3119,4 мг/м³. Концентрация двуокиси азота (кривая 1, рис.2) слабо меняется в ходе опытов, причем средняя концентрация NO_2 составляет 329,8 мг/м³.

При сжигании топливной смеси, содержащей 60 % угля СШ и 40 % гранул из лузги подсолнечника, температура в топке и за первым ходом дымогарных труб после загрузки порции топлива падает в течение 180 секунд (кривая 2, рис. 1а). Концентрация кислорода в дымовых газах (кривая 2, рис. 1б) снижается на 0,09 % в секунду (в 2,8 раза быстрее, чем при сжигании угля СШ), а затем возрастает на 0,012 % в секунду (в 1,71 раз быстрее, чем при сжигании угля СШ).

Средняя концентрация CO в дымовых газах составляет в 1547,8 мг/м³, но с ростом концентрации кислорода в дымовых газах концентрация в них CO снижается до 51,2...142,2 мг/м³ (при концентрации кислорода 12,8...13,8 %) против 955,2...1076,6 мг/м³ при сжигании только СШ.



а



б

Рис. 1. Зависимость температуры дымовых газов T за дымогарными трубами первого хода котла (а) и зависимости концентрации кислорода O_2 в дымовых газах (б) от времени наблюдений (1 – сжигание только угля СШ, 2 – сжигание смеси из 60 % угля СШ и 40 % гранул, 3 – сжигание смеси из 40 % угля СШ и 60 % гранул, 4 – сжигание только гранул).

Когда температура в слое топлива падает, концентрация двуокси азота возрастает (от 323,9 до 716,1 мг/м³), а когда температура начинает повышаться – концентрация NO_2 уменьшается до 443,3 мг/м³ (кривая 2, рис. 2). Среднее значение концентрации NO_2 составляет 526,8 мг/м³ (в 1,6 раза больше, чем при сжигании СШ).

При сжигании топливной смеси, содержащей 40 % угля СШ и 60 % гранул из лузги подсолнечника, после загрузки порции топлива в топку температура в ней и за первым ходом дымогарных труб падает в течение 180 секунд (кривая 3, рис. 1а). Температура падает даже тогда, когда концентрация кислорода в дымовых газах начинает расти (кривая 3, рис. 1б). При загрузке топлива концентрация кислорода в дымовых газах уменьшается на 0,108 % в секунду (в 3,38 раза быстрее, чем при сжигании только угля СШ и в 1,2 раза быстрее, чем при сжигании топливной смеси, содержащей 40 % гранул). Рост концентрации кислорода в дымовых газах происходит быстрее на 0,026 % в секунду (в 3,7 раза быстрее, чем при сжигании только угля СШ, и в 2,17 раз быстрее, чем при сжигании смеси, состоящей на 60 % из угля СШ и на 40 % из гранул).

При сжигании смеси, состоящей на 40 % из угля СШ и на 60 % из гранул средняя концентрация CO в дымовых газах составляет 2213,9 мг/м³, что примерно в 1,4 раза выше, чем

при сжигании только угля СШ или смеси СШ с 40 % гранул.

Кривая изменения концентрации NO_2 в дымовых газах (кривая 3, рис. 2) имеет примерно такой же характер как и в случае сжигания смеси, состоящей на 40 % из гранул. Средняя концентрация NO_2 в дымовых газах составляет 588 мг/м³, что в 1,78 раза выше, чем при сжигании только угля СШ, и в 1,12 раза выше, чем при сжигании смеси угля СШ и 40 % гранул.

При сжигании только гранул из лузги подсолнечника после загрузки порции топлива температура в топке и за первым ходом дымогарных труб не снижается в течение 240 секунд (кривая 4, рис. 1а). При этом концентрация кислорода в дымовых газах вначале уменьшается (кривая 4, рис. 1б) на 0,09 % секунду, а потом возрастает на 0,21 % в секунду. Средняя концентрация CO в дымовых газах составляет 4474,5 мг/м³, что в 2,2 раза выше, чем при сжигании смеси, содержащей 40 % угля СШ, и в 2,83 выше, чем при сжигании только угля СШ или его смеси с 40 % гранул.

Значения концентрации NO_2 (кривая 4, рис. 2) резко колеблются вблизи среднего значения 432,5 мг/м³, которое в 1,31 выше, чем в случае сжигания только топлива СШ.

Таким образом, замена части угля СШ, сжигаемого в высокотемпературном кипящем слое, на гранулы из лузги подсолнечника способствует интенсификации горения топлива до тех пор,

пока содержание гранул в топливной смеси не превысит 60 %. Дальнейшее увеличение процентного содержания гранул в смеси не изменяет скорости горения топлива. Увеличение доли гранул в смеси с углем СШ сверх 40 % способствует возрастанию концентрации окиси углерода (до 2,83 раз) в дымовых газах и, соответственно, росту потерь теплоты от химической неполноты сгорания.

Рост концентрации двуокиси азота в дымовых газах с увеличением доли биомассы в смеси наблюдалось и другими исследователями [6]. Поэтому в указанной работе предложено ограничить концентрацию биомассы в топливной смеси величиной в 35...50 %. Мы в случае совместного сжигания угля СШ и гранул из лузги подсолнечника также склонны к данной рекомендации.

Смесь, содержащая 40 % биогранул, является оптимальной и исходя из экономических соображений, т.к. стоимость углей АШ и СШ в 2 – 3 раза ниже стоимости биогранул (особенно, если эти гранулы изготовлены из древесины). Именно такая смесь сжигалась в котле КВр – 0,8 АК. Результаты химического анализа дымовых газов в этом случае сопоставлялись с соответствующими данными при сжигании только угля АШ. Оказалось, что при сжигании только угля АШ среднее содержание двуокиси серы в дымовых газах равно 1290,6 мг/м³, а при сжигании топливной смеси с гранулами из древесных отходов – 753,6 мг/м³ (в 1,7 раза ниже). Содержание двуокиси азота в дымовых газах в обоих случаях примерно одинаково 306,9...307,1 мг/м³. Содержание окиси углерода в дымовых газах в случае сжигания смеси угля АШ и биогранул на 17 % выше, чем в случае сжигания только штыба. Скорость возрастания концентрации кислорода в дымовых газах в случае сжигания топливной смеси, содержащей 60 % угля АШ и 40 % биогранул, составляет 0,027 % в секунду. Иными словами, топливная смесь угля АШ и биогранул горит с такой же скоростью, что и торф в циркулирующем кипящем слое [7].

Выводы

1. Топливная смесь из низкорреакционного топлива (АШ и СШ) и высокорреакционного топ-

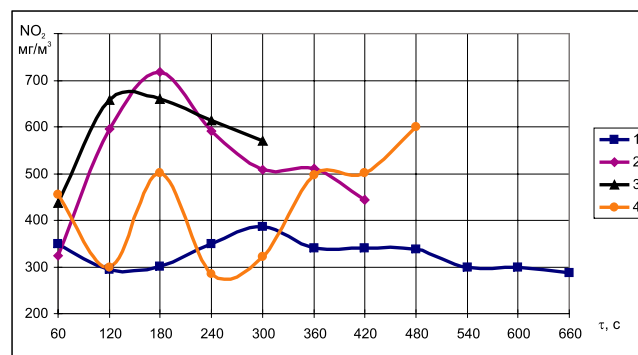


Рис. 2. Зависимость концентрации двуокиси азота в дымовых газах от времени наблюдений (обозначения – смотри рис. 1).

лива (биогранулы) горит быстрее, чем низкорреакционное топливо, причем скорость горения смеси повышается с ростом содержания в смеси биогранул.

2. С ростом содержания в топливной смеси биогранул возрастает эмиссия в атмосферу двуокиси азота, а эмиссия двуокиси серы уменьшается.

3. При содержании в топливной смеси биогранул свыше 40 % эмиссия окиси углерода в атмосферу и, соответственно, потери теплоты от химической неполноты сгорания резко возрастают. Поэтому оптимальным является содержание в топливной смеси 40 % биогранул.

4. Поскольку биогранулы являются СО₂-нейтральным топливом, т.е. при их сгорании в атмосферу выделяется столько же двуокиси углерода, сколько и при естественном гниении древесины или лузги, то замена 40 % угля на биогранулы означает такое же сокращение эмиссии двуокиси углерода в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Isemin R. L., Kuzmin S. N., Kondukov N.B., Mikhalev A.V., Budkova E.V., Konayahin V.V.* On effect of air – separating grid on low – grade solids fuels combustion in a fluidized bed. Proceedings of FBC2005, 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. May 22 – 25, 2005, Toronto, Ontario, Canada.

2. *Котлоагрегат* для сжигания угля в кипящем слое. Патент на полезную модель № 38041 по заявке № 2003133007. – 20.05.04. / Бюллетень № 14.

3. Юфеев Ю.В. Проблемы и перспективы реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии кипящего слоя.// Инженерные системы. – № 2, 2001, с. 41 – 44.

4. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112 с.

5. Bahillo A., Cabanillas A., Gayan P., De Diego L., Adanez J. Co-combustion of coal and biomass in FB boilers: model validation with experimental results from CFB pilot plant. Proceedings of 46th Int. Agency – Fluidized Bed Conversion (IEA – FBC). May 18th, 2003, Jacksonville, Florida.

6. Rajczyk R., Nowak W. Pollutants from waste and coal co-combustion in the CFB & BFB.

Proceedings of IEA – FBC Workshop “Future Challenges for Waste Combustion and Co-combustion in FBC”, May, 24, 2004, Vienna, Austria.

7. Hasa H., Tourunen A., Saastamoinen J., Kirkinen A. – P., Hyppanen T., Kettunen A. Combustion characteristics of fuel – experiment scale – up from bench scale reactors to commercial scale CFB boiler. Proceedings of FBC2005, 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion. May 22 – 25, 2005, Toronto, Ontario, Canada.

Получено 11.11.2005 г.