

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ОЛИВИНОВОГО ПЕСКА КАК НАПОЛНИТЕЛЯ ТОПКИ С КИПАЩИМ СЛОЕМ ПРИ СЖИГАНИИ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА¹

© 2024 г. О. Ю. Милованов^a, *, Д. В. Климов^a, С. Н. Кузьмин^a,
С. В. Григорьев^a, В. С. Кох-Татаренко^a, Ф. Табет^b

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^bBiort’Tech, Фильсхофен-ан-дер-Донау, 94474 Германия

*e-mail: milowanov.o@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 22.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Россия является одним из мировых лидеров по производству подсолнечного масла, и утилизация лузги подсолнечника представляется весьма актуальной проблемой. Лузга имеет низкую влажность (4.4–12.2%) и довольно высокую теплоту сгорания (16–19 МДж/кг), но ее зола содержит значительное количество соединений калия, кальция, магния, которые вызывают шлакование топки котла и быстрый рост отложений золы на его конвективных поверхностях нагрева. Агломерация и шлакование особенно остро проявляются при сжигании отходов растениеводства в кипящем слое кварцевого песка, вызывая дефлюидизацию слоя. Это приводит к частым остановкам котлов для очистки топок. Известны материалы, альтернативные кварцевому песку, но в литературе содержится мало данных об их коммерческом применении. Проанализирована работа топочного устройства с кипящим слоем кварцевого песка и оливина в составе теплогенерирующей установки мощностью 2 МВт при сжигании лузги подсолнечника. Исследован химический состав агломератов и описан механизм их образования. Эксперимент по сжиганию лузги в слое оливина длился непрерывно 600 ч. При проведении периодических измерений фракционного состава слоя оливина, концентраций оксида и диоксида углерода и кислорода в топочных газах образования агломератов не были выявлены.

Ключевые слова: кипящий слой, лузга подсолнечника, дефлюидизация, олин, шлакование, зола, агломерация, кипящий слой, кварцевый песок, влажность, теплота сгорания, отложения золы, котел, поверхность нагрева, очистка топки котла

DOI: 10.56304/S004036362470019X

Заинтересованность в использовании сельскохозяйственных отходов, твердых коммунальных отходов и других видов топлива из биомассы, т.е. углеродно-нейтрального топлива, для производства пара и электроэнергии постоянно растет во всем мире вследствие высокой стоимости ископаемого топлива и проблем с его использованием, а также из-за постоянно ужесточающихся экологических требований [1]. Эффективное использование биомассы возможно в местах ее произрастания или там, где она образуется в виде от-

ходов производства [1]. Выработка энергии из биомассы наиболее перспективна при ее сжигании или газификации в кипящем слое [2]. В топках с кипящим слоем происходит сжигание топлив, имеющих переменные зольность, влажность, фракционный состав, обеспечивается их хорошее перемешивание, контролируется температура процесса, а также выбросы загрязняющих веществ в атмосферу [2].

Биомасса — биогенный твердый продукт, образующийся в результате природных и антропогенных процессов. Она представляет собой смесь органических веществ (главным образом целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) и неорганических веществ (силикатов, оксидов, гидроксидов, сульфатов, фосфатов, карбонатов, хлоридов и т.д.) [3, 4]. Органический состав (С, Н, О, N) примерно одинаков для биомассы различных видов, однако химический состав ее золы сильно разли-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-11-2022-034 от 08.04.2022 ИГК 000000S407522QOZ0002). Наименование проекта “Разработка технологии и создание многотоннажного производства биогранул из лузги подсолнечника с улучшенными характеристиками за счет их высокотемпературной торрефикации”. Головной исполнитель — НИУ “Московский энергетический институт”.

чается. Как правило, древесная биомасса имеет довольно низкую зольность, а в ее золе преобладают Са и Si; зола соломы богата калием и кремнием, а зола шелухи подсолнечника — калием и кальцием [5].

Для процессов сжигания и газификации биомассы в кипящем слое характерны следующие проблемы: агломерация, шлакование, коррозия топki и конвективных поверхностей теплообмена котлов, дефлюидизация [6]. Агломерация материалов слоя влияет на производительность котла. Дефлюидизация (необратимые изменения состава слоя, приводящие к агломерации частиц и прекращению кипения) наблюдается, когда частицы слоя больше не ведут себя как жидкость в результате увеличения своего среднего размера [7]. Агломерация наблюдается даже при температуре 650°C при сжигании сельскохозяйственной биомассы [8].

В последние десятилетия агломерация при сжигании биомассы активно исследуется с целью выявить ее механизмы, факторы, влияющие на нее, а также разработать контрмеры для ее снижения [9–15]. При агломерации, вызванной расплавлением, частицы слоя связываются расплавленной золой [16]. Связующее, например соль щелочных металлов, уже является липким веществом (т.е. расплавленным) еще до того, как оно отложится на частицах слоя. Это связующее имеет поверхностное натяжение, достаточное для смачивания частиц слоя, и довольно низкую вязкость, чтобы сформировать жидкий мостик между частицами [17]. Агломерация вследствие расплавления золы происходит, главным образом, при появлении пиковых (локальных) температур, например “горячих точек”, которые превышают заданную рабочую температуру кипящего слоя. “Горячая точка”, возникающая в результате неравномерной подачи топлива или временной дефлюидизации одного из участков слоя, вызывает локальное повышение температуры, приводящее к плавлению золы [18].

Агломерация, связанная с образованием покрытия на частицах слоя, является следствием осаждения на них газообразных неорганических соединений или твердой фазы золы [14]. Агломерация начинается со склеивания частиц, на которых образуется покрытие или при достижении им определенной температуры [14]. Такая агломерация часто наблюдается при работе топki с кипящим слоем в течение длительного времени. При этом агломераты обычно легко дробятся или распадаются, а это означает, что механическая прочность между агломератами невысока [17].

Замена материала слоя на основе SiO_2 альтернативными материалами, содержащими алюминий, кальций, магний и железо, может замедлить тенденцию к агломерации в псевдоожиженном слое. Например, соединения железа активно реа-

гируют со щелочными компонентами золы биомассы, но не образуют легкоплавких эвтектик. Температура плавления эвтектик, образованных щелочными компонентами золы биомассы с силикатами, составляет 760–790°C, а температура плавления эвтектик, образованных щелочными компонентами золы биомассы с соединениями железа, — 1135°C [13]. Замена кварцевого песка на железную руду при сжигании кукурузных початков позволила увеличить расход сжигаемого биотоплива с 540 до 1007–1009 кг/ч и повысить КПД котла с 55.05 до 79.36% [13].

К таким альтернативным материалам относится оливин [магнезиально-железистый силикат $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$], который использовался в качестве наполнителя слоя при сжигании различных топлив (отходов оливок, коры, соломы пшеницы, древесных отходов, биошлама, торфа, куриного помета, твердых бытовых отходов, смеси щепы осины и ивы) [19–21]. Отмечается, что при сжигании большинства биотоплив в кипящем слое оливина температура начала дефлюидизации повышается в сравнении с сжиганием в слое кварцевого песка. Однако при сжигании соломы пшеницы повышение температуры начала дефлюидизации не было достигнуто. Кроме того, большинство экспериментов проводилось в лабораторных установках, в которых легче контролировать температуру слоя и равномерность распределения топлива по его объему. Также нет данных о применении оливина при сжигании лузги подсолнечника, которая является одним из наиболее употребительных видов биотоплива в России.

Цель данной работы — сравнительные исследования сжигания лузги подсолнечника в кипящих слоях кварцевого песка и оливина в промышленном котле мощностью 2 МВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная часть работы была выполнена на котле мощностью 2 МВт, схема которого показана на рис. 1.

В котле происходит нагрев термомасла ТЛВ-330, которое используется при генерации электроэнергии на установке с органическим циклом Ренкина. Для подобной установки требуется стабильная длительная работа котла без снижения температуры термомасла на выходе из теплогенерирующего устройства. В качестве наполнителя слоя использовали кварцевый песок и оливин.

В табл. 1 представлены химические составы кварцевого песка и оливина. Данные о химическом составе кварцевого песка были представлены ОАО ГСКБ (г. Брест, Республика Беларусь). оливина — поставщиком этих материалов ООО “Родонит” (Россия).

Средний размер частиц оливина составлял 0.34 мм. Выбор такого фракционного состава

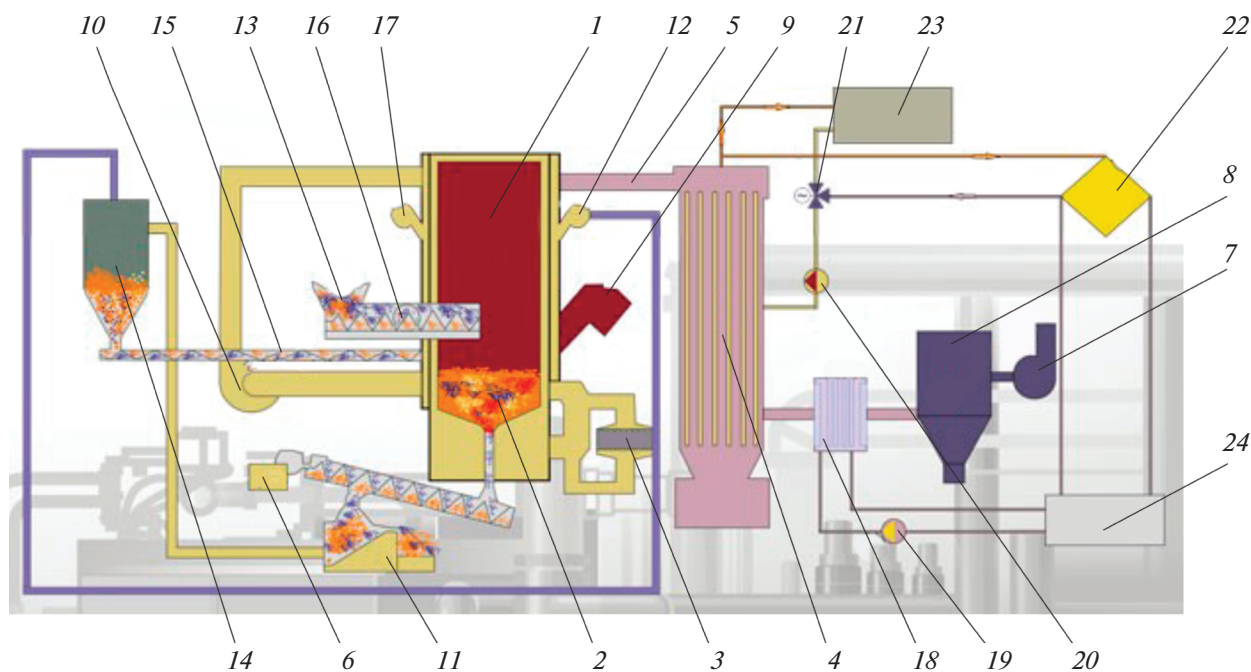


Рис. 1. Схема котла с кипящим слоем.
1 – топка; 2 – кипящий слой; 3 – воздухоподогреватель; 4 – конвективный теплообменник; 5 – переход; 6 – шнек выгрузки инертного материала; 7 – дымосос; 8 – циклон; 9 – растопочная горелка; 10, 12, 17 – вентиляторы напорный, возврата инертного материала и вторичного дутья; 11 – сепаратор инертного материала; 13, 14 – бункеры топливный и инертного материала; 15, 16 – устройства для подачи в топку инертного материала и топлива; 18 – экономайзер; 19, 20 – насосы циркуляционный водяной и термомасляный; 21 – трехходовой клапан; 22 – объект теплоснабжения; 23 – установка с ОЦР-технологией (здесь ОЦР – органический цикл Ренкина); 24 – контур отопления и горячего водоснабжения

оливина был обусловлен желанием использовать такое же тягодутьевое оборудование на котле, как и при сжигании лузги в кипящем слое кварцевого песка с учетом того, что плотность оливина равна 3300, а его насыпная плотность – 2000 кг/м³.

Фракционный состав оливина приведен в табл. 2.

Расчет минимальной скорости псевдоожижения кварцевого песка и оливина выполняли с использованием известного критериального уравнения О.М. Тодеса [22]

$$Re_{кр} = \frac{Ag}{1400 + 5.22\sqrt{Ag}},$$

где $Re_{кр}$ – число Рейнольдса для критической скорости псевдоожижения $w_{кр}$; Ag – критерий Архимеда.

Расчет критериев выполняли для температуры 20 и 800°С (табл. 3).

В топке сжигалась лузга подсолнечника, характеристики которой представлены далее:

Влажность, %	8.24
Зольность, %.....	2.06
Химический состав, %:	
S	0.02
C	48.2
H ₂	5.71
N	0.7
O ₂	35.07
Выход летучих веществ, %	70.48
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	17.88

Таблица 1. Химический состав инертных материалов, % (по массе)

Кварцевый песок								
SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
84.9	0.5	2.2	7.0	0.6	2.8	1.4	0.1	0.3
Оливин								
SiO ₂	MgO	FeO + Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Свободный кварц		Включения	
42.0	50.0	7.0	0.5	0.2	Менее 0.1		0.3	

Таблица 2. Фракционный состав оливина

Размер ячейки сита, мм	Состав, %	
	остаток на сите	проход через сито
0.707	2.99	97.01
0.500	11.96	85.04
0.354	24.93	60.12
0.250	31.90	28.22
0.177	17.95	10.27
0.125	7.98	2.29
0.088	1.99	0.30
0.063	0.20	0.10
Поддон	0.10	—

Таблица 3. Значения критериев для расчета минимальной скорости псевдоожижения

Критерий	Кварцевый песок		Оливин	
	Температура, °C			
	20	800	20	800
Ar	29011	1327	4649	212
Re _{кр}	12.67	0.83	2.64	0.14
w _{кр} , м/с	0.27	0.16	0.12	0.057

Анализ свойств лужги проводили с помощью низкотемпературной лабораторной печи SNOL 67/350, камерной лабораторной электропечи сопротивления SNOL 10/11-B, анализатора углерода, водорода, азота и серы TruSpec, калориметра бомбового АКБ-1.

Химический состав лужги определяли в соответствии с [23, 24]. Содержание кислорода вычисляли как разницу между 100% и процентным содержанием в биомассе золы, влаги, серы, углерода, водорода и азота. Теплоту сгорания лужги рассчитывали в соответствии с [25].

Химический состав золы лужги и агломератов определяли согласно [26]. ОАО ГСКБ представило также образцы агломератов, образовавшихся в кипящем слое при сжигании гранул из лужги подсолнечника [27].

Химический состав золы лужги подсолнечника, % (по массе), приведен далее:

SiO ₂	1.24
MgO	12.50
Fe ₂ O ₃	0.43
Al ₂ O ₃	0.36
CaO	6.39
K ₂ O	38.99

Na ₂ O	0.93
P ₂ O ₅	11.72
TiO ₂	0.02
SO ₃	6.10
Cl	1.77

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сжигание лужги в кипящем слое кварцевого песка осуществляли при температуре слоя 750–800°C и числе псевдоожижения 3.5–4.0, при сжигании в кипящем слое оливина число псевдоожижения было в 2.8 раза выше. В процессе работы через дверцу топki примерно через каждые 4 ч отбирали образцы материала слоя (кварцевого песка или оливина) для исследования его фракционного состава.

В переходе 5 (см. рис. 1) размещался пробоотборный зонд газоанализатора Vario Plus Industrial, с помощью которого определяли содержание оксида углерода в уходящих газах. Измеряли также температуру газов на входе в конвективный теплообменник 4. Анализ состава уходящих газов и измерение их температуры проводили через каждые 24 ч непрерывной работы котла.

По резким изменениям химического состава уходящих дымовых газов можно было судить о дефлюидизации кипящего слоя. Такой метод определения дефлюидизации был предложен в [9]. Он основан на предположении, что при наступлении дефлюидизации процесс горения топлива прекратится или замедлится, что должно привести к росту концентрации кислорода в дымовых газах [12]. При нарушении гидродинамической структуры слоя вследствие дефлюидизации ухудшается перемешивание частиц и газа в слое, процесс сжигания оксида углерода становится неполным, что должно вызвать увеличение его концентрации в дымовых газах [21].

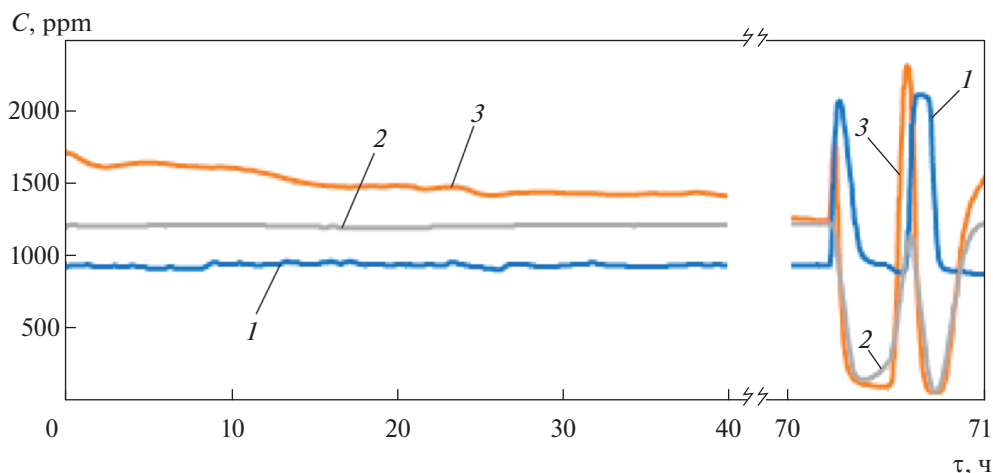


Рис. 2. Зависимость концентрации C кислорода (1) диоксида (2) и оксида (3) углерода в дымовых газах при сжигании лузги подсолнечника в кипящем слое кварцевого песка от времени τ

СЖИГАНИЕ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Сжигание лузги подсолнечника в кипящем слое кварцевого песка осуществляли при числе псевдоожижения 3.5–4.0 и температуре в слое 750–800°C (минимальная скорость псевдоожижения песка составляла 0.8 м/с при псевдоожижении воздухом и комнатной температуре) [27]. Примерно через 70 ч после начала работы котла были отмечены значительные колебания концен-

трации кислорода, оксида и диоксида углерода в уходящих газах (рис. 2), что могло означать наличие агломератов золы и инертного материала в кипящем слое и начало его дефлюидизации.

Действительно, при анализе образцов инертного материала, взятого из топки, были обнаружены агломераты в виде шариков диаметром от 2–3 до 6–7 мм (рис. 3).

Доля агломератов, образовавшихся в кипящем слое после непрерывной работы котла в течение 72 ч, составила примерно 30%, что делало невозможным его работу без увеличения расхода дутьевого воздуха, которое приводило к снижению температуры слоя и прекращению горения. Образующиеся агломераты были очень прочными, освободить слой от них и восстановить работу котла путем вывода части золы не удавалось.

Результаты химического анализа ядра и оболочки агломератов приведены в табл. 4.

Содержание кремния в ядре агломерата в 7.93 раза выше, чем в его оболочке, а содержание калия, наоборот, в 1.8 раза выше в оболочке, чем в ядре слоя. Таким образом, можно предположить, что на первом этапе образуется легкоплавкая эвтектика из соединений кремния, содержащегося в песке, и калия, содержащегося в золе лузги, которая склеивает частицы песка, а на втором этапе этот зародыш агломерата покрывается расплавленной золой.

СЖИГАНИЕ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ОЛИВИНА

В табл. 5 представлены данные об изменении остатка оливина на ячейке сита размером x при исследовании фракционного состава методом отсева. Как следует из таблицы, фракционный



Рис. 3. Вид агломератов золы и инертного материала в разрезе

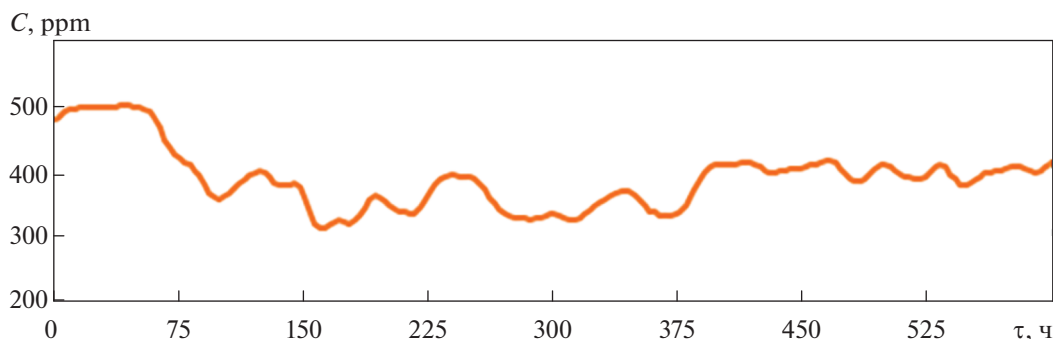


Рис. 4. Зависимость концентрации оксида углерода в топочных газах от продолжительности эксперимента

Таблица 4. Химический состав агломератов золы и кварцевого песка

Компонент	Содержание, г/кг	
	в ядре	в оболочке
Si	69.25	8.73
Fe	0.35	2.17
K	122.18	219.32
Na	0.42	0.44
Al	0.67	1.52
Mg	6.86	57.95
Ca	18.72	90.39
P	3.94	26.03
Ti	0.02	0.12
S	8.99	29.94

состав оливина изменяется в течение первых 58 ч работы котла, а затем практически не меняется. Очевидно, что в первые часы работы топki из кипящего слоя выносятся частицы оливина очень мелких фракций. Возможно также, что происходит незначительное измельчение оливина, вследствие чего его частицы принимают округлую форму и вынос мелкой фракции прекращается. Образование агломератов частиц золы топлива и оливина не обнаружено.

Концентрация оксида углерода C_{CO} в топочных газах составляла 300–500 ppm (рис. 4). Резкий рост концентрации, который свидетельствовал бы об образовании агломератов в кипящем слое и дефлюидизации, не был зафиксирован.

Температура топочных газов t на входе в конвективный теплообменник изменялась в узком диапазоне (рис. 5). Резкое падение или рост температуры топочных газов, которые свидетельствуют о дефлюидизации кипящего слоя, не были отмечены.

Необходимо отметить, что при сжигании смеси щепы осины и ивы в кипящем слое оливина также не было обнаружено образования агломератов [21]. При этом соединения калия в кипящем слое оливина не накапливались, но увеличивалось их содержание в отложениях золы в трубах конвективного теплообменника [21], которое более чем в 2 раза превышало содержание при сжигании смеси щепы осины и ивы в кипящем слое кварцевого песка.

При сжигании лузги подсолнечника в кипящем слое кварцевого песка в отложениях золы в трубах конвективного теплообменника содержание соединений калия составило 181.85 г/кг, а при сжигании в слое оливина — 324.16 г/кг, т.е. в кипящем слое оливина соединения калия не накапливаются, а выносятся из топki и оседают в трубах конвективного теплообменника. Однако эти отложения были сыпучими и не препятствовали стабильной работе котла.

Таблица 5. Остаток оливина, %, на ячейке сита размером x при исследовании фракционного состава в зависимости от продолжительности работы котла τ

τ , ч	x , мм					
	5.0	2.0	1.0	0.4	0.2	0.09
0	0	0	0	24.1	70.6	5.32
4	0	0.04	0.22	43.4	56.0	0.34
8	0	0.04	0.34	51.6	47.8	0.22
12	0	0.04	0.37	50.2	49.1	0.29
16	0	0.04	0.45	63.0	36.2	0.31
20	0	0.04	0.46	67.4	32.0	0.10
24	0	0.04	0.65	73.6	25.3	0.41
28	0	0.08	0.96	81.2	17.5	0.26
32	0	1.10	1.10	82.6	14.8	0.40
36	0.08	0.23	1.50	85.0	13.1	0.09
40	0.12	0.25	1.47	83.3	12.9	1.95
44	0.13	0.24	1.96	82.6	12.4	0.68
48	0.13	0.23	2.10	86.7	10.6	0.25
52	0.13	0.26	2.30	89.4	7.7	0.20
56	0.13	0.33	2.70	88.7	7.8	0.47
200	0.16	0.43	2.90	89.0	7.2	0.31
400	0.16	0.48	3.00	90.1	5.8	0.46
600	0.20	0.58	3.70	91.1	3.8	0.62

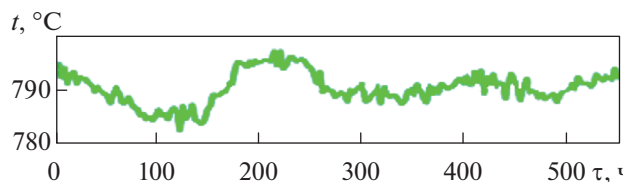


Рис. 5. Зависимость температуры топочных газов от времени

ВЫВОДЫ

1. Стабильная работа топки с кипящим слоем кварцевого песка при сжигании лузги подсолнечника невозможна вследствие образования большого количества агломератов золы и песка диаметром от 2–3 до 6–7 мм, доля которых через 72 ч непрерывной работы котла составляет 30%.

2. Уточнен механизм образования агломератов: на первом этапе образуется легкоплавкая эвтектика из соединений кремния, содержащегося в песке, и калия, содержащегося в золе лузги, которая склеивает частицы песка; на втором этапе зародыш агломерата покрывается расплавленной золой, что придает этим агломератам высокую прочность.

3. Замена кварцевого песка на оливин обеспечивает стабильную работу топки с кипящим слоем, по крайней мере, в течение почти месяца при непрерывном сжигании лузги подсолнечника.

4. При работе топки рассмотренной конструкции возможно периодически выводить часть инертного материала (оливины), удалять из него агломераты, если таковые образуются, и возвращать инертный материал в топку. Это позволяет прогнозировать длительную стабильную работу теплогенерирующего устройства.

5. Стоимость материалов, альтернативных кварцевому песку, которые можно использовать в качестве инертного материала для топок с кипящим слоем при сжигании биомассы с высоким содержанием щелочных и щелочно-земельных элементов в золе, составляет 150–200 евро/т. Эти затраты могут быстро окупиться, если учитывать возможность эффективного сжигания в таком слое дешевых биоотходов, сжигание которых в кипящем слое кварцевого песка невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vamvuka D., Zografos D.** Predicting the behavior of ash from agricultural wastes during combustion // *Fuel*. 2004. V. 83. Is. 14. P. 2051–2057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.012>
2. **Fossil fuels combined combustion with biomass in a fluidized bed combustor.** Mediterranean / E. Kakaras, P. Vourliotis, P. Grammelis, D. Vamvuka // *Combustion Symposium*. Antalya, Turkey, 20–25 June 1999.
3. **An overview of the chemical composition of biomass** / S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva // *Fuel*. 2010. V. 89. Is. 5. P. 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
4. **An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass** / S.V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva, T.J. Morgan // *Fuel*. 2011. V. 94. Is. 1. P. 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
5. **Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion** / S.V. Vassilev, C.G. Vassileva, Y.C. Song, W.Y. Li, J. Feng // *Fuel*. 2017. V. 208. P. 377–409. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036>
6. **Niu Y., Tan H.** Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2016. V. 52. P. 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.09.003>
7. **Lin W., Dam-Johansen K., Frandsen F.** Agglomeration in bio-fuel fired fluidized bed combustors // *Chem. Eng. J.* 2003. V. 96 Is. 1–3. P. 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2003.08.008>
8. **Biomass FBC combustion—bed agglomeration problems** / B.D. Grubor, S.N. Oka, V.S. Ilic, D.V. Dakic, B. Arsic // *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Fluidized Bed Combustion*. American Society of Mechanical Engineers: Orlando, Florida, United States, 7–10 May 1995. V. 1. P. 515–522.
9. **Scala F.** Particle agglomeration during fluidized bed combustion: Mechanisms, early detection and possible countermeasures // *Fuel Process. Technol.* 2018. V. 171. P. 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.11.001>
10. **Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: mechanisms, detection and prevention** / M. Bartels, W. Lin, J. Nijenhuis, F. Kapteijn, J.R. van Ommen // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2008. V. 34. Is. 5. P. 633–666. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.002>
11. **Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review** / J.D. Morris, S. Sheraz, S. Chilton, W. Nimmo // *Fuel*. 2018. V. 230. P. 452–473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.098>
12. **Mettanant V., Basu P., Butler J.** Agglomeration of biomass fired fluidized bed gasifier and combustor // *Can. J. Chem. Eng.* 2009. V. 87. Is. 5. P. 656–684. <https://doi.org/10.1002/cjce.20211>
13. **Visser H.J.M.M., Van Lith S.C., Kiel J. H.A.** Biomass ash-bed material interactions leading to agglomeration in FBC // *J. Energy Resour. Technol.* 2008. V. 130. Is. 1. <https://doi.org/10.1115/1.2824247>
14. **Рябов Г.А., Литун Д.С.** Агломерация при сжигании и газификации топлив в кипящем слое // *Теплоэнергетика*. 2019. № 9. С. 42–59. <https://doi.org/10.1134/S0040363619090042>
15. **Исследование влияния различных факторов на изменение концентрации щелочных элементов, вызывающих агломерацию слоя** / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, О.А. Смирнова, Д.С. Литун //

- Теплоэнергетика. 2021. № 1. С. 85–94.
<https://doi.org/10.1134/S0040363621010173>
16. **Gatternig B., Karl J.** Investigations on the mechanisms of ash-induced agglomeration in fluidized-bed combustion of biomass // *Energy Fuels*. 2015. V. 29. P. 931–941.
<https://doi.org/10.1021/ef502658b>
 17. **Bed agglomeration problems in fluidized-bed biomass combustion** / G.G. Olofsson, Z. Ye, I. Bjerle, A. Andersson // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. V. 41. Is. 12. P. 2888–2894.
<https://doi.org/10.1021/ie010274a>
 18. **Biomass ash-bed material interactions leading to agglomeration in fluidised bed combustion and gasification** / H.J.M. Visser, H. Hofmans, H. Huijnen, R. Kastelein, J.H.A. Kiel // *Prog. Thermochem. Biomass Convers.* 2008. P. 272–286.
<https://doi.org/10.1002/9780470694954.ch20>
 19. **Effects of non-quartz minerals in natural bed sand on agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels** / S. de Geyter, M. Öhman, D. Boström, M. Eriksson, A. Nordin // *Energy Fuels*. 2007. V. 21. Is. 5. P. 2663–2668.
<https://doi.org/10.1021/ef070162h>
 20. **Coating layers on bed particles during biomass fuel combustion in fluidized-bed Boilers** / L.H. Nuutinen, M.S. Tiainen, M.E. Virtanen, S.H. Enestam, R.S. Laitinen // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. Is. 1. P. 127–139.
<https://doi.org/10.1021/ef0300850>
 21. **Almark M., Hiltunen M.** Alternative bed materials for high alkali fuels // *Proc. of the FBC2005 18th Intern. Conf. on Fluidized Bed Combustion*. Toronto, Ontario, Canada, 22–25 May 2005.
 22. **Аэров М.Э., Тодес О.М.** Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968.
 23. **ГОСТ 32985-2014.** Биотопливо твердое. Определение углерода, водорода и азота инструментальными методами. М.: Стандартинформ, 2014.
 24. **ГОСТ 32990-2014.** Биотопливо твердое. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2014.
 25. **ГОСТ 33106-2014.** Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания. М.: Стандартинформ, 2014.
 26. **ГОСТ 10538-87.** Топливо твердое минеральное. Методы определения химического состава золы. М.: Стандартинформ, 1987.
 27. **Исследование свойств золы лузги подсолнечника после ее обработки различными методами торрефикации** / А.В. Небышев, О.Ю. Милованов, Д.В. Климов, С.Н. Кузьмин, А.В. Рыженков, В.А. Дубина, Р.В. Завиженец // *Теплоэнергетика*. 2023. № 4. С. 55–64.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623040045>

Results of Testing Olivine Sand As a Filler for a Furnisher with a Fluidized Bed When Burning Sunflower Husks

O. Yu. Milovanov^{a, *}, D. V. Klimov^a, S. N. Kuzmin^a, S. V. Grigoriev^a,
 V. S. Kokh-Tatarenko^a, and F. Tabet^b

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b Biopiti'Tech, Vilshofen an der Donau, 94474 Germany

*e-mail: milovanov.o@yandex.ru

Abstract—Russia is one of the world leaders in the production of sunflower oil, and the utilization of sunflower husks seems to be a very pressing problem. The husk has low humidity (4.4–12.2%) and a fairly high calorific value (16–19 MJ/kg), but its ash contains a significant amount of potassium, calcium, and magnesium compounds, which cause slagging of the boiler furnace and rapid growth of ash deposits on its convective heating surfaces. Agglomeration and slagging are especially acute when burning crop waste in a fluidized bed of quartz sand, causing defluidization of the layer. This leads to frequent boiler shutdowns to clean the furnaces. Alternative materials to quartz sand are known, but the literature contains little data on their commercial application. The operation of a combustion device with a fluidized bed of quartz sand and olivine as part of a 2-MW heat-generating installation when burning sunflower husks is analyzed. The chemical composition of agglomerates is studied and the mechanism of their formation is described. The experiment on burning husks in a layer of olivine lasted continuously for 600 h. When carrying out periodic measurements of the fractional composition of the olivine layer, the concentrations of carbon oxide, dioxide, and oxygen in the flue gases and the formation of agglomerates was not detected.

Keywords: fluidized bed, sunflower husk, defluidization, olivine, slagging, ash, agglomeration, fluidized bed, quartz sand, humidity, calorific value, ash deposits, boiler, heating surface, boiler furnace cleaning