

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

DOI: 10.17516/1999-494X-0404

УДК 662.611

Dry Residues of Sewage – a Promising Energy Fuel

Andrei V. Zhuikov^{a, b},
Anatoly I. Matiushenko^a, Vladimir A. Kulagin^{*a},
Anatoly M. Zhizhaev^b and Sergey P. Tkach^c

^a*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Institute of Chemistry and Chemical Technology,*

FIS KSC SB RAS

Krasnoyarsk, Russian Federation

^c*LLC Fortuna-Engineering*

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 14.11.2021, received in revised form 22.12.2021, accepted 21.02.2022

Abstract. From the profiles of the curves of differential scanning calorimetry, the maximum intensity of the heat flux, as well as the endothermic and exothermic effects of the combustion of wastewater residues (SWS) were determined. Sludge wastewater residues have a high ash content (more than 50 %), which reduces the value of the lower calorific value in the working state. The high content of volatile substances (more than 80 %) ensures early ignition at a temperature of 268 °C. Having a low ignition temperature, they can be a promising additional fuel to coal after enrichment in order to significantly reduce the ash content and increase the calorific value. The low value of the combustion index equal to 0.4×10^{-6} is due to the low value of the maximum reaction rate equal to 13 %/min and the high burnout temperature equal to 633 °C. The conducted studies have shown that the combustion of WWS does not lead to a deterioration in the operating conditions of the furnace screens in boiler furnaces due to the high content of minerals in the ash with a high melting point (iron and calcium phosphates). The high content of phosphorus in wastewater residues contributes to the immobilization of mobile iron into phosphates. Such a composition of WWS will help to reduce the mobility of heavy metals in slag and ash residues of co-combustion with coal during subsequent long-term storage. The results of this study should be used in the design of thermal power facilities.

Keywords: sewage sludge, incineration, ash mineral composition, thermogravimetric analysis, ecology.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Government of the Krasnoyarsk Territory, the Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and Scientific and Technical Activities (Project No. 2022031008477).

The equipment of the Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use of the FRC «KSC SB RAS» was used in the work.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: vak-sfu@mail.ru

Сухие остатки стоков – перспективное энергетическое топливо

**А. В. Жуйков^{а, б}, А. И. Матюшенко^а,
В. А. Кулагин^а, А. М. Жижаев^б, С. П. Ткач^в**

*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бИнститут химии и химической технологии,
ФИЦ КНЦ СО РАН*

Российская Федерация, Красноярск

^вООО Фортуна-Инжиниринг

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. По профилям кривых дифференциальной сканирующей калориметрии была определена максимальная интенсивность теплового потока, а также эндотермические и экзотермические эффекты горения остатков сточных вод (ОСВ). Иловые остатки сточных вод имеют высокую зольность (более 50 %), что снижает значение низшей теплоты сгорания в рабочем состоянии. Высокое содержание летучих веществ (более 80 %) обеспечивает раннее зажигание при температуре 268 °С. Имея низкую температуру зажигания, они могут быть перспективным добавочным топливом к углю после обогащения с целью существенного снижения зольности и увеличения теплоты сгорания. Низкое значение индекса горения, равное $0,4 \times 10^{-6}$, обусловлено низким значением максимальной скорости реакции, равной 13 %/мин, и высокой температурой выгорания, равной 633 °С. Проведенные исследования показали, что сжигание ОСВ не приводит к ухудшению условий эксплуатации топочных экранов в топках котлов из-за высокого содержания минералов в золе с высокой температурой плавления (фосфаты железа и кальция). Высокое содержание фосфора в остатках сточных вод способствует иммобилизации подвижного железа в фосфаты. Такой состав ОСВ будет способствовать уменьшению мобильности тяжелых металлов в шлаковых и зольных остатках совместного сжигания с углями при последующем долговременном хранении. Результаты данного исследования целесообразно использовать при проектировании объектов теплоэнергетики.

Ключевые слова: иловые остатки сточных вод, сжигание, минеральный состав золы, термогравиметрический анализ, экология.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (проект № 2022031008477).

В работе использовалось оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ «КНЦ СО РАН».

1. Введение

Очистные сооружения, перерабатывающие канализационные стоки, выступают неизменным элементом структуры современного городского кластера. Очистные сооружения представляют собою комплекс сооружений, в которых располагаются устройства и приспособления для очистки сточных вод и хранения твердых остатков. Как правило, эти сооружения работают по схеме полной биологической очистки. В очистные сооружения попадают производственные и сточные воды, поступающие от главных внегородских коллекторов по подводящим каналам. Первой ступенью является механическая очистка, с помощью которой задерживается бумага, тряпье, полимерный и волокнистый мусор. Крупные минеральные примеси и песок отделяются от сточных вод в песколовках. Предварительная аэрация сточных вод производится с целью удаления растворенных газов и снижения концентрации загрязняющих веществ, а также доокисления и осаждения ионов тяжелых металлов. Осаждение нерастворимых взвешенных и удаление плавающих веществ происходит в радиальных отстойниках. Осветленные сточные воды вступают в реакцию с активным илом в аэротенках. После биологической очистки избытки активного ила из главной иловой насосной станции подаются на иловые поля, находящиеся за территорией городов, где остатки сточных вод (ОСВ) копятся и хранятся десятилетиями (рис. 1). Вопросы утилизации такого рода отходов имеют высокую актуальность в связи с количественным ростом городского населения и повышением экологических требований к качеству жизни, а также сохранности окружающей среды.

ОСВ не используются широко в промышленном или аграрном секторах из-за высокого содержания активной бытовой химии и других вредных веществ, при этом площадь иловых полей с каждым годом увеличивается, что становится проблемой не только для городского хозяйства, но и для безопасности природной среды в целом. Перспективные направления использования ОСВ включают применение в аграрном (после выполнения необходимых мероприятий по их обогащению – компостированию) и в промышленном секторах после термической обработки: сжигания, пиролиза или газификации. С учетом технологии термолизной обработки было предложено получать из ОСВ карбонизированный остаток, который в дальнейшем можно применять как топливо или в дорожном строительстве [1]. Проведенные исследования по применению установки термического разложения с кондуктивным подводом тепла для све-

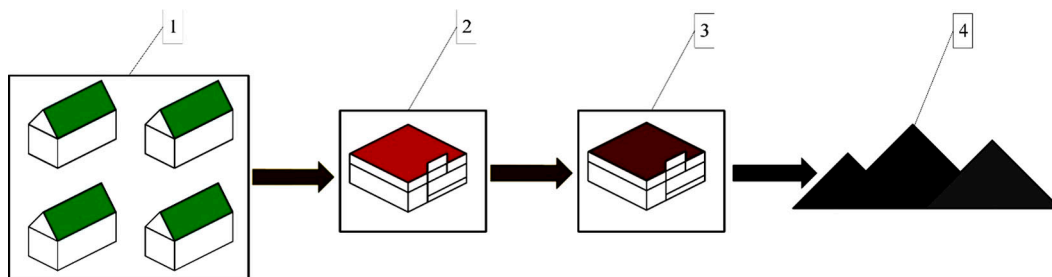


Рис. 1. Общая схема очистки сточных вод в городах (1 – населенный пункт; 2 – очистные сооружения; 3 – главная иловая насосная станция; 4 – иловые поля)

Fig. 1. General Order of waste water treatment in cities (1 – settlement; 2 – treatment facilities; 3 – main sludge pumping station; 4 – silt fields)

жего и депонированного ОСВ показали, что при пиролизе свежего ила пиролизной жидкости и газа получается больше, чем при пиролизе депонированного ила [2]. Kim D. и др. [3] получали твердое топливо с повышенной теплотой сгорания из ОСВ, применяя «Combustion melting technology», включающую процессы пиролиза, горения и плавления для удаления тяжелых металлов из золы ОСВ. Указанные методы малопродуктивны и требуют большого непродуктивного расхода энергии на тепловую генерацию. Более перспективным представляется попутное сжигание ОСВ с углем в тепловых котлах при условии отсутствия отрицательного воздействия на процесс горения и состав зол [4–7].

Для анализа процессов горения твердого топлива применяют различные методы исследования [4, 5, 8–10]. Chen J. и др. [6] проводили изучение совместного горения ОСВ с углем с применением ТГА, установив, что увеличение доли угля в топливной смеси улучшает характеристики горения, что является ожидаемым негативным результатом ввиду высокой зольности ОСВ. Ozfidan M. и др. [7] исследовали горение ОСВ с применением ТГА и установили, что для ОСВ характерна низкая реакционная способность. Однако Guo S. и др. [11], исследуя горение ОСВ совместно с углем, установили, что увеличение массовой доли ОСВ в топливной смеси влияет на снижение температуры зажигания и увеличение индекса горения (S). Добавление до 10 % ОСВ к углю влияет также на снижение шлакования топочных экранов в топках котлов. Исследования влияния добавок ОСВ на состав зол в указанных работах не проводили в связи с малым количеством зольных остатков.

Целью данной работы служит изучение возможности использования иловых остатков сточных вод при сжигании каменного угля в качестве добавок, определение основных характеристик горения ОСВ, а также уровня их влияния на изменение химического состава зол с экологической точки зрения.

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования были взяты сухие иловые остатки сточных вод (рис. 2) с иловых полей правобережных очистных сооружений г. Красноярска. Примерное время пребывания ОСВ под открытым небом составило около 10 лет.

Горение ОСВ изучено для воздушно-сухой аналитической пробы. ОСВ с начальным размером частиц менее 20 мм измельчали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Германия) (максимальное число оборотов – 528 об/мин, гарантированная тонина помола – менее 100 мкм). Для подготовки экспериментальных образцов использовали аналитическую просеивающую машину Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Германия) с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Таким образом, получали образцы ОСВ с размерами частиц 53–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах [12]. Калорийность топливных образцов определяли в калориметре ИКАС 6000 (ИКА, Германия). Влажность измеряли по ГОСТ 8.649–2015, зольность – по ГОСТ 55661–2013, выход летучих веществ – по ГОСТ R 55660–2013, содержание серы – по ГОСТ 32979–2014, высшую теплоту сгорания – по ГОСТ 147–2013, содержание углерода, водорода, азота, серы – по ГОСТ 32979–2014, содержание кислорода – по ГОСТ 27313–2015. Результаты технического анализа ОСВ приведены в табл. 1.



Рис. 2. Сухие иловые остатки сточных вод до (а) и после (б) их озоления.

Fig. 2. Dried sewage sludge before (a) and after (b) their combustion

Табл. 1. Технические характеристики и элементный состав иловых остатков

Table 1. Technical characteristics of sewage sludge sample

Образец	W_t^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Элементный состав летучих веществ, масс.%					Q_s^{daf} , МДж/кг	Q_f^r , МДж/кг
				С	Н	Н	С	О		
ОСВ	6,7	51,3	80,3	53,0	5,8	3,4	0,7	35,8	21,5	7,0

Примечание: W_t^a – аналитическая доля влаги образца; A^d – зольность; V^{daf} – выход летучих веществ; Q_s^{daf} – высшая теплота сгорания в сухом-беззольном состоянии; Q_f^r – низшая теплота сгорания в рабочем состоянии

Термический анализ образцов проводили с применением синхронного термоанализатора SDT Q600 (TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA). Кривые убыли массы (ТГ), скорости изменения массы (ДТГ) и сканирующей калориметрии (ДСК) регистрировали для навесок ОСВ массой $6,0 \pm 0,25$ мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при постоянной скорости нагрева 20 °С/мин. Навески отбирали с помощью аналитических весов MS 105du (Mettler Toledo, Швейцария). Основные характеристики процессов горения определяли путем анализа термогравиметрических кривых, полученных из Universal Analysis 2000 (программное обеспечение V5.5.24 от TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA).

Химический состав образцов определяли методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (РСА) с помощью энергодисперсионного спектрометра S 2 RANGER (Bruker, Германия). Зола массой 4 г, измельченную до крупности 100 мкм, тщательно перемешивали с борной кислотой и прессовали толстослойные излучатели диаметром 40 мм. Первичное излучение – Pd_{ka} . Детектор вторичного излучения – беззотный кремний дрейфовый (XFlash). Содержание элементов автоматически пересчитывали в оксидную форму в программе EQUA ALL для удобства балансовых расчетов.

Фазовый анализ (РФА) исходной и зольной проб ОСВ выполняли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 (Буревестник, Россия). Излучение – $\text{Cu}_{K\alpha}$, скорость сканирования – 0,02 град/мин, время накопления в точке – 1 сек. Расчет и расшифровку дифрактограмм проводили по стандартной методике с использованием базы данных эталонных спектров PDF 2.

Анализ формы и состава частиц ОСВ осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ4000 (Hitachi, Япония) (ускоряющее напряжение – 20 кэВ), оборудованного энергодисперсионным спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax 75 (Bruker, Германия), в режиме низкого вакуума (без напыления платины).

По данным ТГА определяли индекс горения (S) [13, 14], который применяется для сравнения горючести разных образцов топлив и включает в себя температурные условия зажигания и выгорания углеродного остатка. Высокое значение индекса горения характерно для топлив с высокими параметрами. Расчет индексов воспламенения, выгорания и горения производили по формуле

$$S = \frac{DTG_{\max} \cdot DTG_{\text{mean}}}{T_3^2 \cdot T_6}$$

где DTG_{\max} – максимальная скорость реакции, %/мин; DTG_{mean} – средняя скорость реакции (от зажигания до выгорания углеродного остатка); T_3 и T_6 – температуры зажигания и выгорания углеродного остатка, °С.

Для вычисления индекса горения по кривым ТГ и ДТГ методом пересечения кривых определяли температуру зажигания (T_3) и температуру выгорания (T_6). Визуализация методики определения значений T_3 , T_6 , DTG_{\max} и T_{\max} представлена на рис. 3 [15, 16]. Температуре T_{\max} соответствовала максимальная скорость реакции DTG_{\max} .

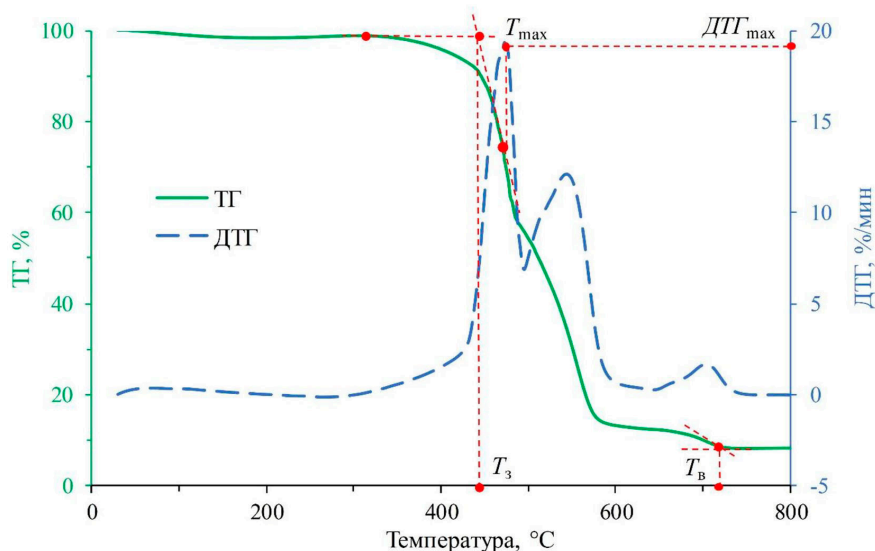


Рис. 3. Определение параметров горения методом пересечения кривых

Fig. 3. Determination of combustion parameters by the method of intersection of curves

Результаты и обсуждение

Высокая зольность ОСВ (см. табл. 1) может оказывать отрицательное воздействие на процесс его горения, высокий выход летучей органики (см. табл. 1), наоборот, может иметь положительный эффект. Необходимо подробно исследовать состав ОСВ. По данным РФА, минеральная часть исходного образца ОСВ представлена в основном кварцем (SiO_2 , $d = 4,25; 3,34; 1,817 \text{ \AA}$, PDF, 5–490) и плагиоклазами ($\text{MeAlSi}_3\text{O}_8$, где $\text{Me} = \text{Na}, \text{K}, \text{Ca}$, например альбит (Na, Ca) $\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$, $d = 4,01; 3,23; 3,18 \text{ \AA}$, JCPDS, 41–1480) (рис. 4). В небольших количествах присутствуют гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $d = 7,53; 2,98; 1,98 \text{ \AA}$, JCPDS, 33–311), эттрингит ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, $d = 9,75; 5,89; 2,55 \text{ \AA}$, JCPDS, 41–1451) и, вероятно, смесь различных фосфатов кальция (гидроксилapatит – $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, $d = 8,29; 3,47; 2,79 \text{ \AA}$, JCPDS, 9–432 или карбонатгидроксилapatит – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_2$).

По данным электронной микроскопии, частицы ОСВ представляют собой пористые органо-минеральные конгломераты размером 200–300 мкм (рис. 5). Минеральные включения (до 50 мкм) представлены в основном кварцем, алюмосиликатами магния, кальция, калия (вероятно: песок, пыль, грязь), сульфатами и/или фосфатами кальция и оксидами железа (окалина) (рис. 5 и 6). Встречаются отдельные крупные частицы гипса, апатита и плагиоклазов (рис. 6). Оксиды железа распространены по всей пористой матрице в виде микронных частиц.

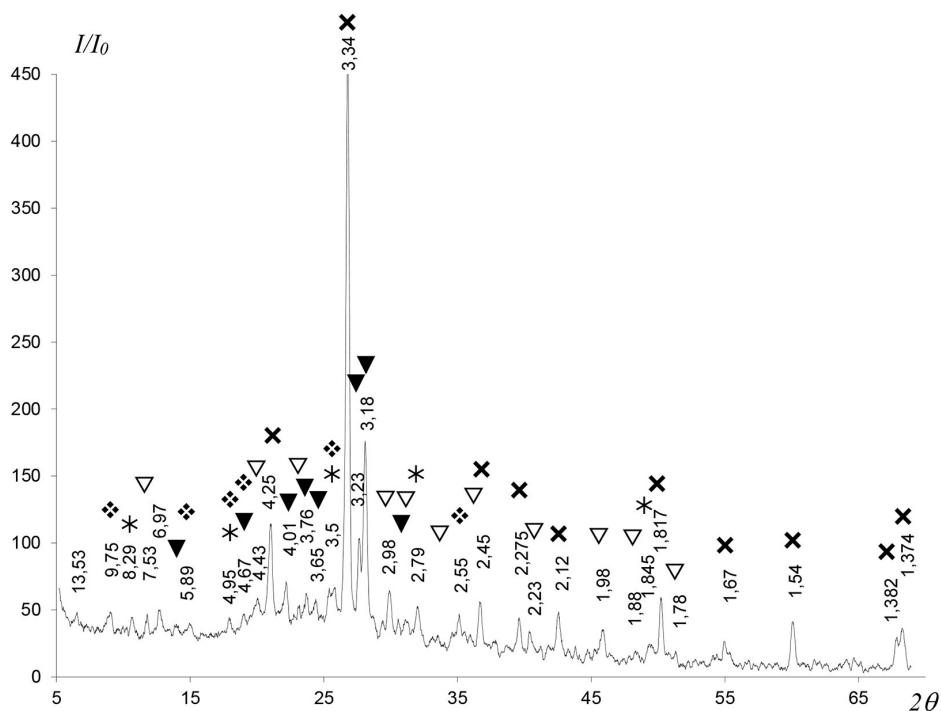


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы ОСВ с указанием идентифицированных фаз. Обозначения: **X** – кварц (SiO_2), **▼** – альбит ($(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$), **◆** – эттрингит ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), **▽** – гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ***** – гидроксилapatит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)

Fig. 4. XRD pattern of sewage sludge with identified minerals marked. Symbol: **X** – quartz (SiO_2), **▼** – albite ($(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$), **◆** – ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), **▽** – gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ***** – hydroxylapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)

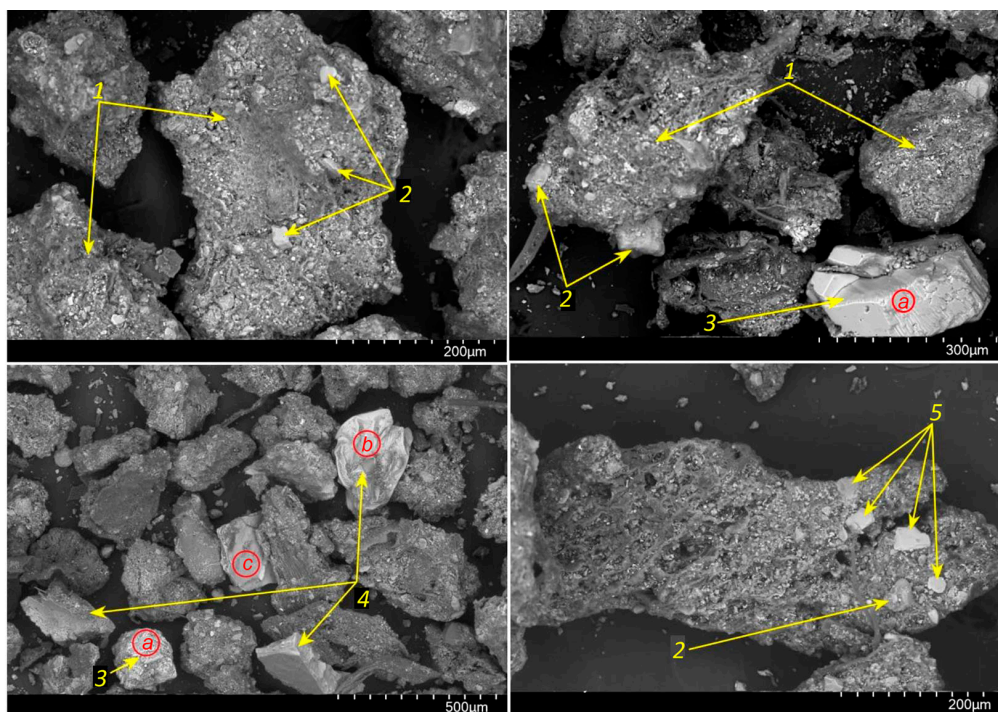


Рис. 5. СЭМ-изображения остатков сточных вод (1 – пористые органо-минеральные конгломераты; 2 – кварц; 3 – гипс; 4 – апатит; 5 – железистые пластинчатые включения (окалина); мелкие белые точки – оксиды железа)

Fig. 5. SEM images of sewage sludge particles. (1 – porous organo-mineral conglomerates; 2 – quartz, 3 – gypsum, 4 – apatite; 5 – iron oxide lamellar inclusions (dross); small white dots are iron oxides)

Таблица 2. Химический состав золы остатков сточных вод

Table 2. Chemical composition of sewage sludge ash

Зола	Содержание, %										
	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	ZnO	SO ₃	TiO ₂	SrO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
ОСВ	45,2	17,5	11,4	2,0	10,7	0,2	4,8	1,7	0,1	0,2	5,3

После прокаливания зола ОСВ приобретает рыжую окраску (см. рис. 2b) из-за окисления соединений железа до гематита (Fe₂O₃). Химический состав зольного остатка представлен в табл. 2. По данным РФА, зола представлена кварцем (SiO₂, $d = 4,25; 3,34; 1,817 \text{ \AA}$, PDF, 5–490) (рис. 7). Появились линии гематита (Fe₂O₃, $d = 3,68; 2,70; 2,52 \text{ \AA}$, JCPDS, 33–664), вайтлоquita (Ca₃(PO₄)₂, $d = 6,48; 2,87; 1,92 \text{ \AA}$, JCPDS, 9–169) и ангидрита (CaSO₄, $d = 3,49; 2,21; 1,869 \text{ \AA}$, JCPDS, 37–1496) в результате окисления и дегидратации исходных минералов при нагревании. Несмотря на существенное уменьшение содержания плагиоклазов, интенсивность рефлекса $d = 3,2 \text{ \AA}$ не сокращается, что говорит об образовании новой фазы, а его ширина – о малых размерах ее частиц.

Дифракционная картина наиболее близко соответствует структуре фосфата железа (Fe-PO₄, $d = 5,19; 3,46; 3,20 \text{ \AA}$, JCPDS, 15–655). Высокое содержание фосфора в золе косвенно свидетель-

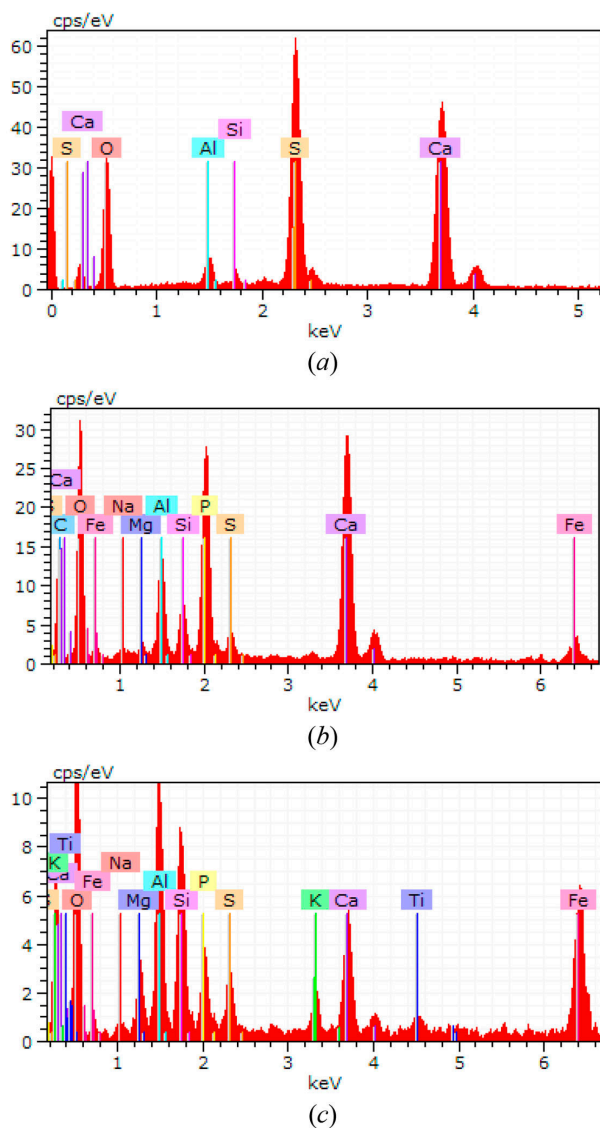


Рис. 6. Энергодисперсионный спектр по областям *a*, *b*, *c* рис. 5 (*a* – частица представлена в основном гипсом (сульфат кальция), *b* – частица представлена в основном апатитом (фосфат кальция), *c* – частица представлена смесью микроклина, апатита, гипса и оксидов железа)

Fig. 6. EDS spectrum for *a*, *b*, *c* circles Fig. 5 (*a* – The particle is mainly gypsum (calcium sulfate), *b* – The particle is mainly apatite (calcium phosphate), *c* – The particle is mixture of microcline, apatite, gypsum and iron oxides)

ствует в пользу этого предположения. По данным электронной микроскопии, некоторые частицы вайтлоклита оказываются буквально усыпаны субмикронными частицами фосфата железа (рис. 8). То есть фосфат кальция фиксирует на своей поверхности подвижное железо.

Химический состав зольных остатков интересен с точки зрения сжигания угля с добавками ОСВ и формирования комплексных золошлаковых отходов. Основную часть составляет кремний (в виде кварца и силикатов), кальций (в кальците, гипсе и апатите) и железо (в оксидах и силикатах). Полученные результаты свидетельствуют, что внесение добавок ОСВ будет содействовать прочному связыванию значимых количеств токсичных тяжелых металлов в подвижных формах,

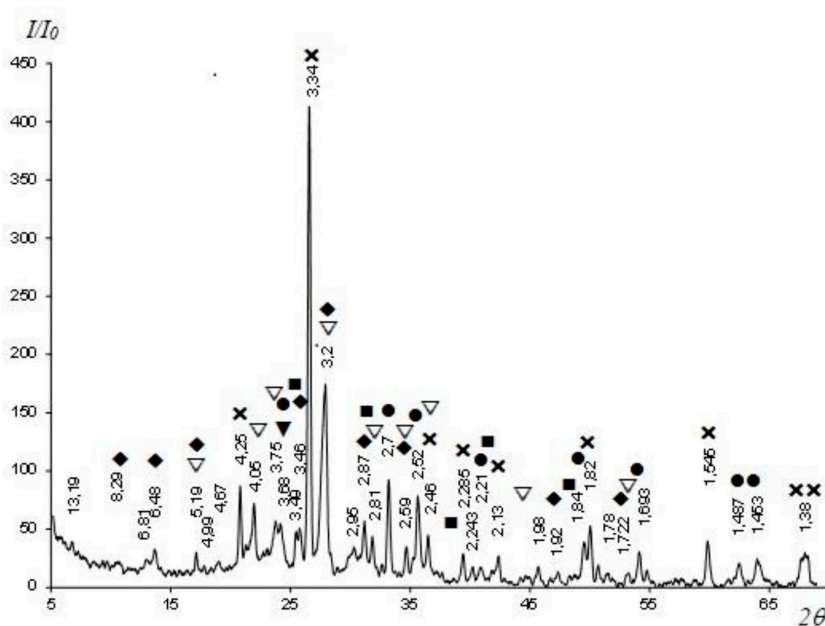


Рис. 7. Фрагмент дифрактограммы золы ОСВ с указанием идентифицированных фаз. Обозначения: **X** – кварц (SiO_2), **●** – гематит (Fe_2O_3), **▽** – фосфат железа (Fe-PO_4), **◆** – вайтлоцит ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), **■** – ангидрит (CaSO_4)

Fig. 7. XRD pattern of sewage sludge ash with identified minerals marked. Symbol: **X** – quartz (SiO_2), **●** – hematite (Fe_2O_3), **▽** – iron phosphate (Fe-PO_4), **◆** – whitlockite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), **■** – anhydrite (CaSO_4)

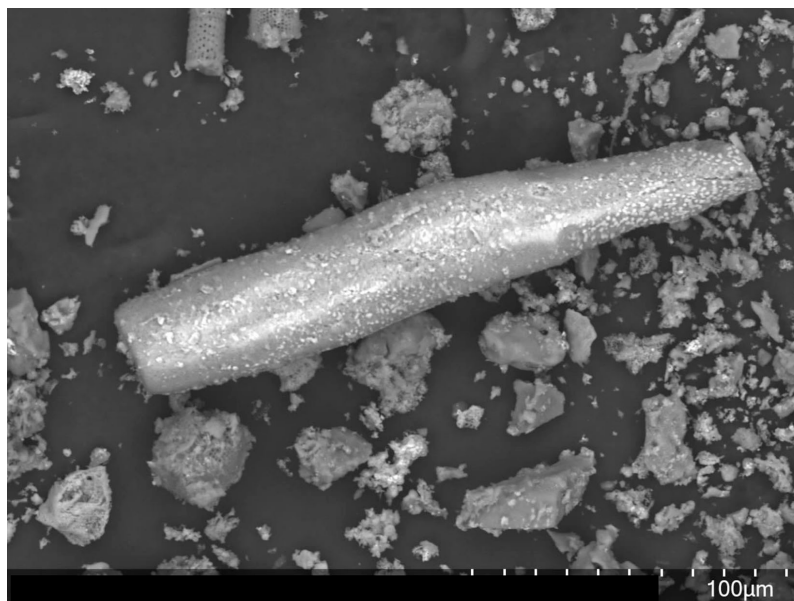


Рис. 8. СЭМ-изображение частицы золы остатков сточных вод (на частице фосфата кальция (серое) многочисленные белые точки фосфата железа).

Fig. 8. SEM images of sewage sludge ash particle (white dots of iron phosphate on the surface whitlockite)

способных к миграции при длительном хранении в природных условиях. Высокая концентрация фосфора в добавках может привести к дополнительному связыванию мобильных вредных компонентов каменных углей в малорастворимых фосфатах.

Основные характеристики горения представлены на рис. 9, 10 и в табл. 3. Прогрев топливных частиц и удаление абсорбционной влаги из ОСВ происходит в интервале температур 25–170 °С и сопровождается убылью массы до 4 % (рис. 9), а также небольшим эндотермическим эффектом (рис. 10). Высокое значение летучих (см. табл. 1) и содержание большого количества органических соединений, содержащих целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин (рис. 2а), обеспечивает более раннее их загорание и горение в интервале температур 170–270 °С, масса ОСВ при этом снизилась на 5 % (рис. 2а).

При дальнейшем нагреве происходит загорание коксового остатка ОСВ при температуре 270 °С (табл. 3). Горение продолжается в интервале температур 270–630 °С и сопровожда-

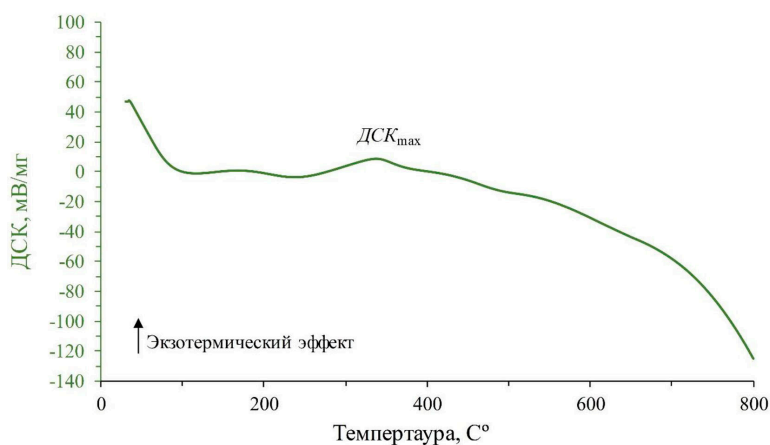


Рис. 9. Кривые ТГ и ДТГ нагрева остатков сточных вод

Fig. 9. TG and DTG curves for the combustion of sewage sludge

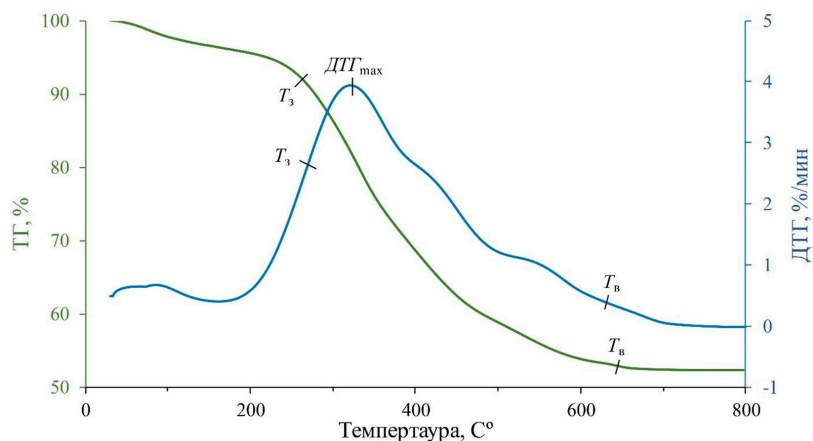


Рис. 10. Кривая ДСК нагрева остатков сточных вод

Fig. 10. DSC curve for the combustion of sewage sludge

Таблица 3. Характеристики горения остатков сточных вод

Table 3. Combustion characteristics of sewage sludge

Образец	T_3 , °C	$T_{ДТГ}$, °C	$T_{в*}$, °C	$ДТГ_{max}$, %/МИН	$ДТГ_{mean}$, %/МИН	$ДСК_{max}$, МВ/МГ	$T_{ДСК}$, °C	S , $10^{-6}/\text{МИН}^{-2}$, °C ⁻³
ОСВ	270	330	630	13	7,23	9	337	0,4

Примечание: $ДСК_{max}$ – максимальная интенсивность теплового потока; $T_{ДСК}$ – температура, соответствующая $ДСК_{max}$.

ется убылью массы около 38 %. Максимальная скорость реакции составила 13 %/мин при температуре 330 °C (см. рис. 9), при этом максимальная интенсивность потока достигла 9 мВ/мг (см. рис. 10). Температура максимального тепловыделения почти совпадает с температурой, соответствующей максимальной скорости реакции (см. табл. 3). Кривые ДТГ и ДСК демонстрируют затяжное ступенчатое горение, которое заканчивается в области высоких температур (около 630 °C). Это связано с многообразием органических компонентов, входящих в состав ОСВ.

Низкая температура зажигания не влияет на увеличение индекса горения ОСВ, который имеет очень малое значение по сравнению с бурными углями. На это значение повлияла низкая скорость реакции и высокая температура выгорания. К примеру, при таких же условиях нагрева бородинский бурый уголь имеет индекс горения $1,5 \times 10^{-6}$, а балахтинский бурый уголь – $1,3 \times 10^{-6}$, что в три раза выше, чем у ОСВ.

Заключение

Иловые остатки сточных вод имеют высокое содержание летучих веществ, высокую зольность и низкую теплоту сгорания. При низкой температуре зажигания ОСВ могут быть перспективным добавочным топливом к углю, но для этого необходимы предварительные мероприятия по их обогащению с целью существенного снижения зольности и увеличения теплоты сгорания. Значение индекса горения, равное $0,4 \times 10^{-6}$, обусловлено низким значением максимальной скорости реакции, равной 13 %/мин, и высокой температурой выгорания, равной 633 °C.

Состав золы сжигания остатков сточных вод из-за существенного содержания минералов с высокой температурой плавления (фосфатов железа и кальция) не приведет к ухудшению условий эксплуатации топочных экранов котлов.

Высокое содержание фосфора в остатках сточных вод способствует иммобилизации подвижного железа в фосфаты. Такой состав ОСВ будет способствовать уменьшению мобильности тяжелых металлов в шлаковых и зольных остатках совместного с углями сжигания при последующем долговременном хранении.

Результаты данного исследования целесообразно использовать при проектировании объектов теплоэнергетики.

Список литературы / References

- [1] Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Переработка илового осадка очистных сооружений, *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 2017, 7(1), 183–187

[Gunich S. V., Yanchukovskaya E. V., Dneprovskaya N. I. Processing of sludge from sewage treatment plants, *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya I Biotekhnologiya*, 2017, 7(1), 183–187 (in Russian)].

[2] Буренков С.В., Грачев А. Н., Забелкин С. А. Термическая утилизация иловых осадков сточных вод методом быстрого пиролиза в сеточном реакторе, *Вестник технологического университета*, 2016, 19(22), 40–43 [Burenkov S. V., Grachev A. N., Zabelkin S. A. Thermal utilization of sewage sludge by fast pyrolysis in a grid reactor, *Bulletin of the Technological University*, 2016, 19(22), 40–43 (in Russian)].

[3] Kim D., Park D.-K., Lim Y.-T., Park S.-N., Park Y.-S., Kim K. Combustion melting characterization of solid fuel obtained from sewage sludge, *Energies*, 2021, 14(4), 805.

[4] Lu J., Chen W. Investigation on the ignition and burn out temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis, *Appl. Energy*, 2015, 160, 49–57.

[5] Zhao R., Qin J., Chen T., Wu J. TG-FTIR study on co-combustion of bituminous coal semicoke and lignite. *JTAN*, 2020.

[6] Chen J., Liu J., He Y., Huang L., Sun S., Sun J., Chang K., Kuo J., Huang S., Ning X. Investigation of co-combustion characteristics of sewage sludge and coffee grounds mixtures using thermogravimetric analysis coupled to artificial neural networks modeling, *Bioresour. Technol.*, 2017, 225, 234–245.

[7] Ozfidan M., Haykiri-Acma H., Yaman S. Co-combustion of lignite with sewage sludge and refuse-derived fuel, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 2019, 38(6), e13307.

[8] Zhang K., Zhang K., Cao Y., Pan W. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses, *Bioresour. Technol.*, 2013, 131, 325–332.

[9] Zheng Sh., Hu Y., Wang Zh., Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends, *J ENERGY INST.*, 2020, 93, 1373–1381.

[10] Chen J., Sun Y., Zhang Z. Evolution of trace elements and polluting gases toward clean co-combustion of coal and sewage sludge, *Fuel*, 2020, 280, 118685.

[11] Guo S., Yang Q., Liang H., Che D., Liu H., Sun B. Effect of blending sewage sludge with coal on combustion and ash slagging behavior, *RSC Advances*, 2019, 9(51), 29482–29492.

[12] Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement, *Fuel Process. Technol.*, 2021, 223, 106986.

[13] Oladejo J.M., Adegbite S., Pang C. H., Liu H., Parvez A. M., Wu T. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass, *Appl. Energy*, 2017, 188, 215.

[14] Liu H., Gong S., Jia C., Wang Q. TG-FTIR analysis of co-combustion characteristics of oil shale semi-coke and corn straw, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, 127, 2531.

[15] Bala-Litwiniak A, Zajemska M. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler, *Renew. Energy*, 2020, 162, 151.

[16] Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends, *J. Energy Inst.*, 2020, 93, 1373.