



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 280–288

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 280–288

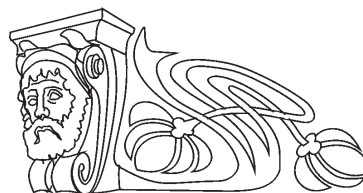
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-280-288>, EDN: SSQDFM

Научная статья

УДК 544.3.03

Исследование свойств твердого остатка пиролиза осадков сточных вод



Р. И. Кузьмина¹, Р. Н. Кубашева¹✉, З. Х. Кунашева²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012 г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Казахстан, 090000 г. Уральск, пр. Н. Назарбаева, д. 162

Кузьмина Раиса Ивановна, доктор химических наук, профессор кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, kuzminaraisa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Кубашева Раушан Нуртаевна, аспирант Института химии, r_kubasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Кунашева Зарипа Хайроллиевна, кандидат химических наук, доцент, заведующий исследовательской лабораторией экологии и биогеохимии, kunasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

Аннотация. Приведены результаты термической переработки илового осадка хозяйственно-бытовых сточных вод в лабораторных условиях. Описан процесс пиролиза, проведенный на установке с реактором периодического действия, при атмосферном давлении в интервале температур от 20 до 700–800°C, до прекращения образования продуктов реакции. В результате переработки илового осадка на пиролизической установке получены углеводородные соединения в газообразном, жидком виде, а также твердый углистый остаток. Установлено, что при пиролизе иловых осадков сточных вод, выход продуктов процесса зависит от скорости нагрева сырья. Показаны результаты хроматографических, рентгенофазовых, спектроскопических исследований состава, свойств и структуры продуктов пиролиза. В качестве исходных материалов в данной работе использовались образцы иловых осадков сточных вод из разных точек чека нефтегазового месторождения Западно-Казахстанской области. Представлены результаты химического анализа исходного илового осадка (рН водной вытяжки, катионно-анионный состав, определение органического вещества в пробе), отобранного из нескольких точек иловой площадки. Проведен дифференциально-термический анализ иловых осадков. При пиролизе илового осадка происходит термическая стерилизация и образуются производные продукты (газ, жидкость, твердый углистый остаток), которые могут быть использованы как топливо или в качестве сырья нефтехимического синтеза. Кроме того, в процессе пиролиза тяжелые металлы (например, ртуть и кадмий) могут быть отделены вместе с углистым остатком. Предложено использовать твердый остаток пиролиза в качестве сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов, так как это экономически и экологически выгодно.

Ключевые слова: иловый осадок, пиролиз, пиролизный остаток, водопоглощение, сорбционная способность, дифференциально-термический анализ

Для цитирования: Кузьмина Р. И., Кубашева Р. Н., Кунашева З. Х. Исследование свойств твердого остатка пиролиза осадков сточных вод // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 280–288. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-280-288>, EDN: SSQDFM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Investigation of the properties of the solid residue of the pyrolysis of sewage sludge

R. I. Kuzmina¹, R. N. Kubasheva¹✉, Z. Kh. Kunasheva²

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²West Kazakhstan University named after M. Utemisov, 162 Prospect N. Nazarbayev, Uralsk 090000, Kazakhstan

Raisa I. Kuzmina, kuzminaraisa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Raushan N. Kubasheva, r_kubasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Zaripa Kh. Kunasheva, kunasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

Abstract. This article presents the results of the thermal processing of sludge from domestic wastewater under laboratory conditions. The pyrolysis process is carried out in a batch reactor with an original design. Gaseous and liquid forms of hydrocarbon compounds, as well as solid carbonaceous residue, were obtained after processing the sludge in a pyrolytic plant. It is established that during pyrolysis of sludge sewage sludge, the output of the process products depends on the heating rate of the raw material. The results of chromatographic, X-ray diffraction, spectroscopic studies of the composition, properties, and structure of pyrolysis products are presented in the following sections. This research



project involved the analysis of sludge sediment samples obtained from different locations within the oil and gas field of the West Kazakhstan region. The results of the chemical analysis of the initial sludge (pH of the water extract, cationic-anionic composition, determination of organic matter in the sample) selected from several points of the sludge site are presented. Differential thermal analysis of silt sediments has been carried out. The results of this study demonstrate that the pyrolysis of sludge leads to thermal sterilization and the production of gaseous, liquid, and solid carbonaceous residue, which exhibit potential as fuel sources or raw materials for petrochemical synthesis. In addition, heavy metals (such as mercury and cadmium) can be separated from the carbonaceous residue during pyrolysis. It is proposed to use the solid pyrolysis sludge as a sorbent for the collection of oil and petroleum products, as it is economically and environmentally beneficial.

Keywords: sewage sludge, pyrolysis, pyrolysis of sludge, water absorption, sorption capacity, differential thermal analysis

For citation: Kuzmina R. I., Kubasheva R. N., Kunasheva Z. Kh. Investigation of the properties of the solid residue of the pyrolysis of sewage sludge. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 280–288 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-280-288>, EDN: SSQDFM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Процесс пиролиза иловых осадков хозяйственно-бытовых сточных вод является на сегодняшний день одним из перспективных направлений в решении многих вопросов, связанных с утилизацией данного вида отходов. Из многих литературных источников известно, что именно

процесс пиролиза является весьма актуальным, так как продукты переработки илового осадка могут быть использованы в качестве вторичного сырья.

В представленной ниже табл. 1 приведены методы переработки твердых бытовых отходов и их характерные особенности [1].

Таблица 1 / Table 1

Методы переработки твердых бытовых отходов Methods of solid household waste processing

Метод / Method	Характерная особенность / Characteristic feature
Захоронение на специально подготовленных полигонах / Burial at specially prepared landfills	Сложные инженерные сооружения, оснащенные системами борьбы с загрязнением подземных вод и атмосферного воздуха / Complex engineering structures equipped with systems for combating pollution of groundwater and atmospheric air
Компостинг / Compostin	В процессе компостирования из-за повышения температуры примерно до 50–60 градусов естественным, промышленным способом до 85 градусов погибают личинки вредителей и семена сорняков, а также все возбудители. Экологически чистое и бесплатное удобрение / In the process of composting, due to an increase in temperature to about 50–60 degrees, pest larvae and weed seeds, as well as all pathogens, die naturally, industrially up to 85 degrees. Environmentally friendly and free fertilizer
Термическая обработка твердых бытовых отходов / Heat treatment of solid household waste	Позволит сократить общий объем твердых бытовых отходов более чем в 10 раз, получать дополнительную энергию от их сжигания / It will reduce the total volume of solid household waste by more than 10 times, and receive additional energy from their combustion
Плазменная обработка / Plasma treatment	Конечный продукт переработки является абсолютно безвредным, позволяя перерабатывать все виды отходов без предварительной подготовки / The final product of processing is absolutely harmless, it allows processing all types of waste without preliminary preparation

Иловые осадки в зависимости от происхождения содержат в себе большое количество компонентов разного происхождения, следовательно, в зависимости от наличия в них тех или иных химических соединений и элементов, к их переработке должны применяться разные методы [2].

Химический состав осадков оказывает большое влияние на их водоотдачу. Соединения железа, алюминия, хрома, меди, а также

кислоты, щелочи и некоторые другие вещества, содержащиеся в производственных сточных водах, способствуют интенсификации процесса обезвоживания осадков и снижают расход химических реагентов на их коагуляцию перед обезвоживанием. Масла, жиры, азотные соединения, волокнистые вещества, наоборот, являются неблагоприятными компонентами. Окружая частицы осадка, они нарушают процессы уплотнения и коагуляции, а также увеличивают содержание



органических веществ в осадке, что сказывается на ухудшении его водоотдачи. По химическому составу осадки подразделяются на три группы: 1) преимущественно минерального состава; 2) преимущественно органического состава, имеющие зольность менее 10%; 3) имеющие в своем составе вещества органического и минерального происхождения, зольность таких осадков может изменяться от 10 до 60%.

В качестве исходных материалов в данной работе использовались разные образцы иловых

осадков сточных вод Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения.

Материалы и методы

В лабораторных условиях изучен один из химических способов переработки илистых осадков процесса очистки сточных вод – пиролиз. Процесс пиролиза проводили на установке с реактором периодического действия [3].

Схема установки, на которой проводился пиролиз, представлена на рис. 1.

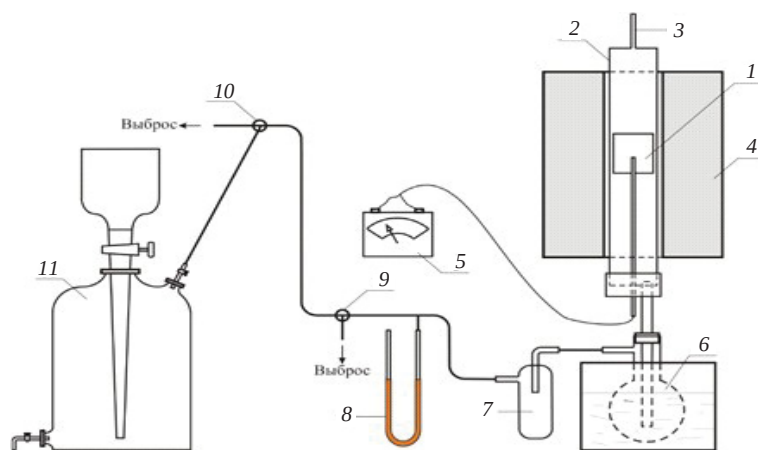


Рис. 1. Схема установки пиролиза: 1 – контейнер для сырья; 2 – реактор; 3 – трубка продувки; 4 – терморегулируемая печь; 5 – датчик температуры; 6 – охлаждаемый приемник жидких продуктов; 7 – ловушка; 8 – манометр; 9, 10 – краны, 11 – газометр

Fig. 1. Pyrolysis installation scheme: 1 – container for raw materials; 2 – reactor; 3 – purge tube; 4 – temperature-controlled furnace; 5 – temperature sensor; 6 – cooled receiver of liquid products; 7 – trap; 8 – manometer; 9, 10 – taps, 11 – gasometer

Объект исследования предварительно высушивали до постоянной массы при 100–140°C.

Подготовленную навеску в количестве 100 г помещали в реактор периодического действия 2. Перед началом работы установку проверяли на герметичность и продували инертным газом (гелием) в течение 30 мин для удаления воздуха из системы. Процесс проводили при атмосферном давлении. Нагрев реактора с сырьем осуществляли с помощью терморегулируемой печи 4 в интервале температур от комнатной (20–21° С) до 700–800°C до прекращения образования продуктов реакции. Контроль за температурой в реакционной зоне осуществлялся датчиком 5. Жидкие продукты конденсировались в охлаждаемом приемнике 6, а несконденсированные газы, проходя ловушку 7 и манометр 8, собирались в газометре 11 (см. рис. 1).

Пиролиз илового осадка вели при скорости нагрева сырья в реакторе, которая составила 10, 20 и 30 град/мин. Исследование сорбционной способности твердого остатка после пиролиза осадочного ила проводилось по нефти плотностью 0,846 г/см³. Для определения показателя нефтепоглощения пробы осадочного ила отбирались в интервале температур пиролиза 600–800°C. Исследование сорбционной способности проводилось по нефти и моторному маслу. Количество сорбента в эксперименте определялось количеством нефти и нефтепродукта, т.е. толщиной слоя нефтепродукта.

Результаты и их обсуждение

На основании полученных лабораторных исследований выявлено, что иловый осадок представляет собой сложнейшую многокомпонентную систему. Несмотря на то что в со-



ставе иловых осадков сточных вод содержатся патогенные бактерии, изменение разнообразия таких микробных сообществ зависит от продолжительности естественного высыхания. При данном процессе под влиянием неблагоприятных факторов внешней среды, таких как перепады температуры воздуха, воздействия ультрафио-

летового излучения, формируется микробная структура близкая допустимой с преобладанием представителей естественной микрофлоры [4, 5].

В табл. 2 представлены результаты химического анализа илового осадка, отобранного из восьми точек иловой площадки Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения.

Таблица 2 / Table 2

Результаты химического анализа илового осадка
Results of chemical analysis of sludge sediment

Место отбора проб Sampling location	рН водной вытяжки pH of the aqueous extract	Катионно-анионный состав, мг в 100 г осадке Cation-anion composition, mg per 100 g sediment					Органическое вещество, % Organic matter, %
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻	
1	7,07	585	84	8,1	23,18	103,87	2,36
2	7,37	135	30	16,4	29,28	45,44	2,41
3	7,41	145	21	3,4	38,43	54,24	2,36
4	7,34	940	0	56,2	167,75	542,39	2,44
5	7,23	655	30	3,1	47,58	67,71	2,52
6	6,95	715	54	8,5	32,33	117,69	2,41
7	7,14	660	45	29,4	51,85	126,56	2,36
8	7,11	480	36	22,4	29,28	99,61	2,36

Как видно из табл. 2 значения рН колеблются в пределах 6,95–7,41, т. е. среда нейтральная. В иловых осадках отсутствуют карбонат-ионы. По определению органического вещества в пробах наблюдаются равномерные значения от 2,36% до 2,52%, что не характерно для других обнаруженных ионов: кальция, магния, калия, хлоридов и гидрокарбонатов. Из табл. 2 видно, что содержание хлорид-ионов превышает предельно допустимую концентрацию. По-видимому, для обеззараживания и обработки бытовых сточных вод предварительно были использованы растворы хлора. В пробе из

четвертой точки по всем показателям получены высокие концентрации анионов и катионов. Это связано с тем, что данный образец илового осадка хранится с наименьшей продолжительностью естественного высыхания.

Осадок сточных вод, согласно проведенным исследованиям (рентгенофазовому, термогравиметрическому, ИК-спектроскопическому анализам), представляет собой сложнейшую многокомпонентную систему. Результаты лабораторного исследования органических веществ исследуемых образцов илового осадка приведены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Органические составляющие иловых осадков промышленных и коммунальных сточных вод
Organic constituents of sludge from industrial and municipal wastewater

№	Наименование вещества Name of the substance	Количество, мг/кг Quantity, mg/kg
1	Синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ) Synthetic surface-activesubstances	1850–1900
2	Эфириозвлекаемые соединения (жиры, масла ит.п.) Ether-recoverable compounds (fats, oils and the like)	140–180
3	Нефтепродукты / Petroleum products	4,20–7,88
4	Фенолы / Phenols	Отсутствуют / No
5	Формальдегид / Formaldehyde	Не обнаружен / Not detected



Органическая составляющая (25–30 масс. %) включает синтетические поверхностно-активные вещества, эфиры, извлекаемые компоненты (жиры, масла и т.п.), нефтепродукты (легкие и средние фракции смолистых веществ), азот-, кислород- и фосфорсодержащие органические соединения.

Комплексный термографический анализ

осадка сточных вод показал его термическую устойчивость в области температур от 105 до 180°C, после чего начался процесс термоокислительной деструкции органической составляющей.

На рис. 2 показан иловый осадок, отобранный из нескольких точек иловой площадки и иловый остаток после процесса пиролиза.



а/а



б/б

Рис. 2. Иловый осадок сточных вод: а – до процесса пиролиза; б – после процесса пиролиза
Fig. 2. Sludge sediment of wastewater: a – before the pyrolysis process; b – after the pyrolysis process

При пиролизе происходит термическая стерилизация и образуются производные продукты (газ, жидкость, твёрдый углистый остаток), которые могут служить топливом или использоваться как сырьё для нефтехимического производства. Кроме того, в процессе пиролиза тяжёлые металлы (например, ртуть и кадмий) могут отделяться вместе с углистым остатком.

Экономическая эффективность процесса пиролиза может быть повышена путём про-

изводства товарных продуктов из твёрдых (например, адсорбентов), жидких (удобрения) или газообразных (синтез-газ) продуктов процесса.

Выход продуктов зависит от скорости нагрева сырья, что видно из табл. 4.

Соотношение получаемых продуктов зависит главным образом от температуры процесса, а также от содержания в исходном продукте органических веществ и влажности.

Таблица 4 / Table 4

Материальный баланс пиролиза илового осадка
Material balance of sludge pyrolysis

Продукт пиролиза Pyrolysis product	Скорость нагрева, град/мин Heating rate, deg/min		
	10	20	30
<i>m</i> (сырья), г / <i>m</i> (raw materials), g	100,0	100,0	100,0
<i>V</i> (газа), мл / <i>V</i> (gas), ml	13000	12600	12500
<i>m</i> (газа), г / <i>m</i> (gas), g	12,6	14,9	13,5
<i>m</i> (жидкости), г / <i>m</i> (liquid), g	25,6	24,4	20,6
<i>m</i> (тв. остатка), г / <i>m</i> (solid residue), g	61,1	58,1	59,1
Время процесса, мин / Process time, min	115	90	85
Потери, % / Loss, %	0,7	2,6	6,8



Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что соотношение полученных продуктов по агрегатному состоянию зависит от скорости нагрева сырья, что видно из диаграммы на рис. 3.

При пиролизе осадков в обычных условиях можно выделить в основном два типа реакций:

1) термический распад исходного вещества и дальнейшее разложение получающихся промежуточных соединений;

2) конденсация и полимеризация молекул, образовавшихся в результате первичных реакций деструкции исходного сырья [6, 7].

Выходящий из пиролизного аппарата продукт является сложной смесью газообразных, жидких и твердых веществ, состав которых зависит от химической природы сырья и физических параметров нагревания.

В настоящее время из продуктов пиролитического превращения наиболее интересен твердый остаток, представленный техническим углеродом [8, 9].

В научных работах предлагается использовать твердый остаток после специальных методов очистки для производства брикетированного топлива [10].

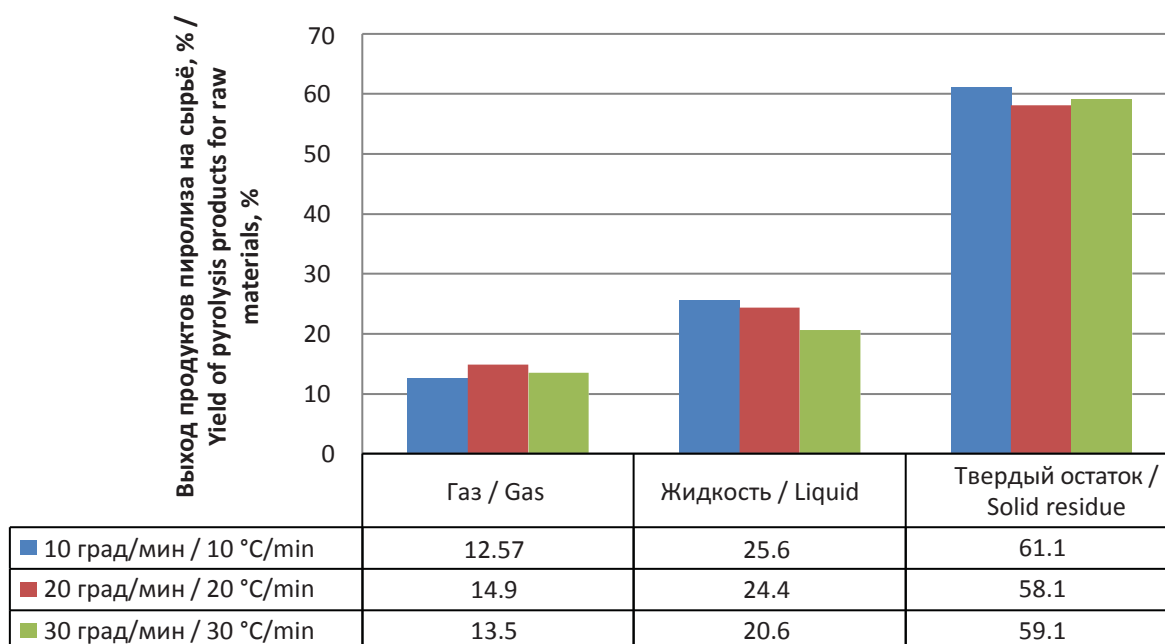


Рис. 3. Соотношение получаемых продуктов по агрегатному состоянию

Fig. 3. The ratio of the products obtained by aggregate state

Одним из направлений применения илового осадка в промышленности является создание сорбента на основе твердых остатков после пиролиза илового осадка хозяйственно-бытовых сточных вод.

Важнейшими характеристиками для сорбента являются плавучесть, водопоглощение и сорбционная способность. На рис. 4 представлены зависимости водопоглощения неизмельченного и измельченного образцов от времени насыщения.

Неизмельченные образцы имеют большую способность к водопоглощению, чем образцы с меньшим размером частиц. С увеличением температуры термообработки данная характеристика твердого остатка незначительно

снижается в последние сутки исследований. Запаса плавучести должно хватать до завершения операции сбора отработанного сорбента. Исследования показали, что после сбора нефти и моторного масла сорбент сохранял свою плавучесть более 10 суток, кроме измельченного образца, полученного при температуре пиролиза 800° С.

Нефтепоглощение твердого остатка после пиролиза осадочного ила показало, что наибольшей сорбционной способностью по нефти обладает измельченный иловый остаток, подвергшийся пиролизу при температуре 700° С, более высокая температура ведет к резкому увеличению зольности, обгару угля и падению его сорбционной способности.

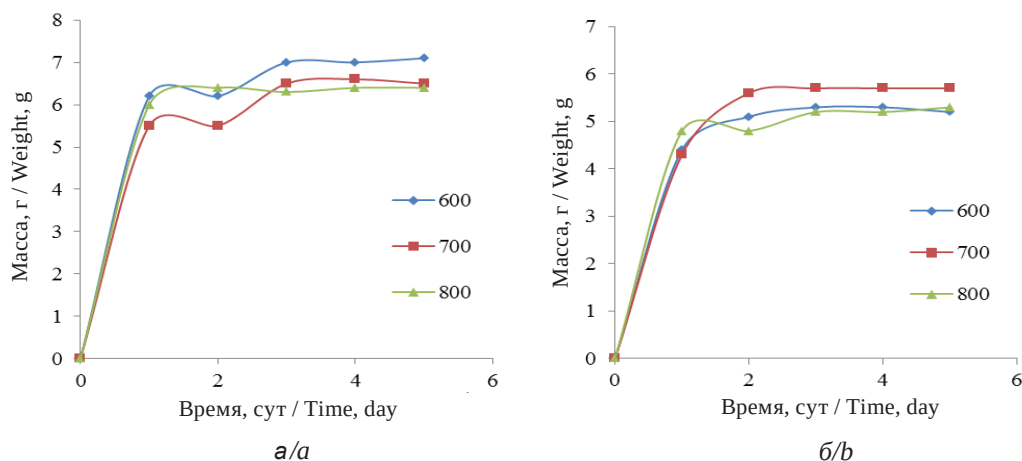


Рис. 4. Водопоглощение неизмельченного и измельченного образцов от времени насыщения: а – неизмельченный образец; б – измельченный образец
 Fig. 4. Water absorption of non-crushed and crushed samples from the saturation time: a – non-crushed sample; b – crushed sample

При увеличении зольности может достигаться критический размер частиц сорбента, когда процесс смачивания нефтью прекращается и сорбция не происходит.

Наибольшей сорбционной способностью по моторному маслу обладает неизмельченный сорбент. Результаты экспериментов представлены в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

Нефтепоглощение остатком после пиролиза осадочного ила
Oil absorption by residue after pyrolysis of sedimentary sludge

Температура процесса пиролиза, °С Pyrolysis process temperature, °C	Поглощение нефти сорбентом, % Absorption of oil by sorbent, %		Поглощение моторного масла сорбентом, % Absorption of motor oil by sorbent, %	
	1	2	1	2
600	50,0	56,7	73,3	36,6
700	53,3	66,7	66,7	33,3
800	56,7	60,0	80,0	40,0

Примечание. 1 – неизмельченный сорбент; 2 – измельченный сорбент.
 Note. 1 – non-crushed sorbent; 2 – crushed sorbent.

На рис. 5 представлена дифрактограмма илового осадка очистки сточных вод.

По результатам дифференциально-термического анализа установлено, что нагревание образца приводит к удалению из него воды, что находит отражение на кривой в виде размытого эндотермического эффекта в интервале 60–180° С с максимумом при 120° С. Убыль массы, которая соответствует этому процессу, составляет около 12%. Дальнейшее нагревание приводит к окислению органической составляющей илового остатка. Этот процесс сопровождается размытым экзотермическим эффектом (на ДТА) с несколькими подмаксимумами при 340, 480,

580° С, интервал температур 210–630° С. Эти эффекты соответствуют окислению органических продуктов разной природы, экзоэффект при 580°С, вероятно, соответствует окислению свободного углерода, получившегося в результате разложения органических веществ или высокоуглеродных продуктов разложения. Убыль массы составляет 53%. Конечный продукт представляет собой твердое вещество оранжевого (светло-коричневого) цвета.

Заключение

Пиролитическая переработка илового осадка очистных сооружений носит безотходный

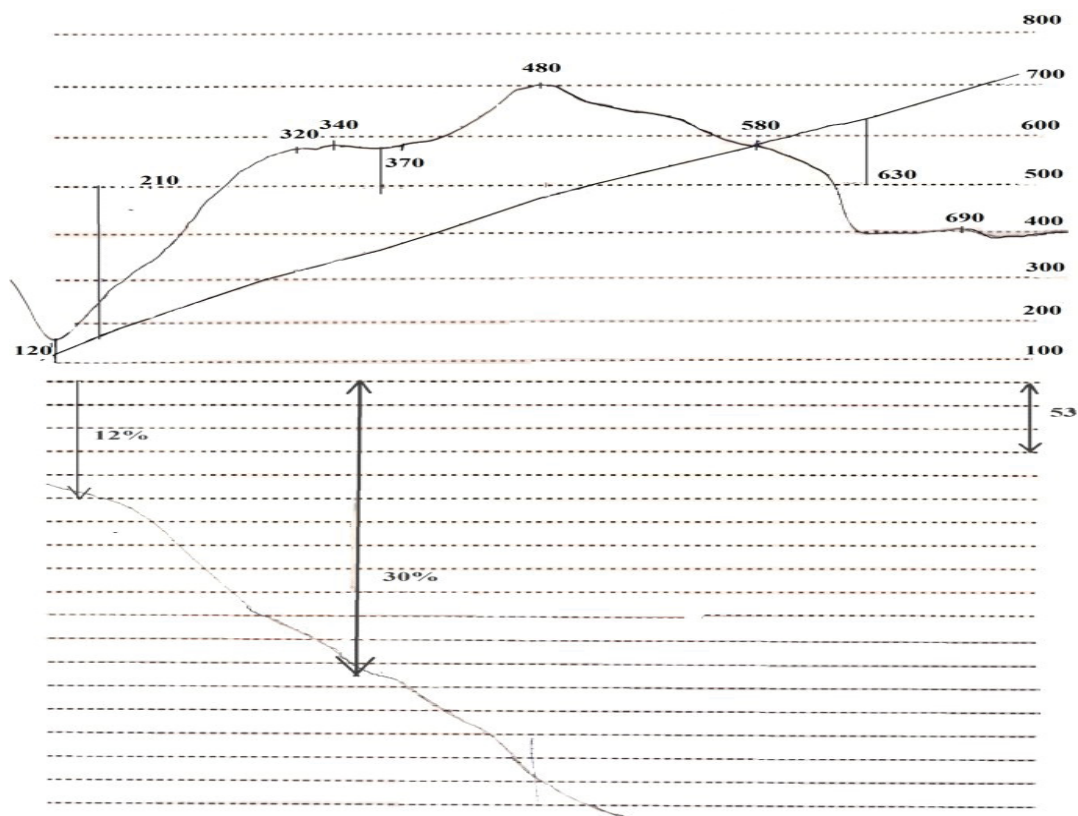


Рис. 5. Дифрактограмма илового осадка очистки сточных вод

Fig. 5. Diffractogram of sludge sediment of wastewater treatment

характер. При пиролизе происходит термическая стерилизация и образуются производные продукты (газ, жидкость, твёрдый углистый остаток), которые могут быть использованы как топливо или в качестве сырья для нефтехимического производства.

Угlistое вещество, образующееся в процессе пиролиза, не спекается, имеет рыхлый характер, как и исходный ил, и может быть использовано в качестве восстановителя в металлургических производствах или сорбента для сбора нефтепродуктов. Утилизация отработанного сорбента после отжима из него нефти и нефтепродуктов возможна в качестве наполнителя в асфальто-битумные смеси.

Следует вывод, что крупномасштабное использование различных сорбентов в целях охраны окружающей среды (очистка сточных вод, газовых выбросов, загрязненных почв) требует расширения производства пористых углеродных материалов из дешевых видов органического сырья: ископаемых твердых топлив, различных природных и техногенных органических отходов, материалов.

В связи с этим исследование процесса термической переработки иловых осадков сточных вод методом пиролиза является весьма перспективным направлением.

Список литературы

1. Ветошкин А. Г. Технологии защиты окружающей среды от отходов производства и потребления: учебное пособие. СПб. : Лань, 2016. 304 с.
2. Уланова О. В., Салхофер С. П., Вюни К. Комплексное устойчивое управление отходами. Жилищно-коммунальное хозяйство: учебное пособие. М. : Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 520 с. <https://doi.org/10.17513/np.231>
3. Кузьмина Р. И., Ромаденкина С. Б., Михель А. А., Игнатьев С. В. Переработка резиновых отходов методом высокотемпературного пиролиза // Химия твердого топлива. 2016. № 4. С. 56–60.
4. Biswas K., Turner S. J. Microbial community composition and dynamics of moving bed biofilm reactor systems treating municipal sewage // Appl. Environ. Microbiol. 2012. Vol. 78. P. 855–864. <https://doi.org/10.1128/AEM.06570-11>
5. Seviour R., Nielsen P. H. Microbial Ecology of Activated Sludge. London : IWA Publishing Company, 2010. 688 p.



6. Kim Y., Parker W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, iss. 5. P. 1409–1416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.056>
7. Яцун А. В., Коновалов Н. П., Ефименко И. С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ // *Химия твердого топлива*. 2013. № 4. С. 60–63.
8. Шиканова К. А. Технология переработки твердого углеродсодержащего остатка, являющегося отходом пиролиза автошин // *Вестник РУДН*. 2015. № 4. С. 80–83.
9. Попов В. С., Папин А. В., Игнатова А. Ю. Анализ возможности получения брикетированного топлива из отходов пиролиза автошин с использованием связующего – вторичного полимера // *Вестник КузГТУ*. 2016. № 1. С. 172–177.
10. Папин А. В., Игнатова А. Ю., Макаревич Е. А., Неведров А. В. Получение композиционного топлива на основе технического углерода пиролиза автошин // *Вестник КузГТУ*. 2015. № 2. С. 107–113.
3. Kuzmina R. I., Romadenkina S. B., Mikhel A. A., Ignatiev S. V. Processing of rubber waste by high-temperature pyrolysis. *Chemistry of Solid Fuels*, 2016, no. 4, pp. 56–60 (in Russian).
4. Biswas K., Turner S. J. Microbial community composition and dynamics of moving bed biofilm reactor systems treating municipal sewage. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2012, vol. 78, pp. 855–864. <https://doi.org/10.1128/AEM.06570-11>
5. Seviour R., Nielsen P. H. *Microbial Ecology of Activated Sludge*. London, IWA Publishing Company, 2010. 688 p.
6. Kim Y., Parker W. A Technical and economic evaluation of pyrolysis of sewage sludge for the production of biooil. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, iss. 5, pp. 1409–1416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.056>
7. Yatsun A. V., Konovalov N. P., Efimenko I. S. Liquid pyrolysis products of used car tires under microwave exposure. *Solid Fuel Chemistry*, 2013, no. 4, pp. 60–63 (in Russian).
8. Shikanova K. A. Technology of processing of solid carbon-containing residue, which is a waste of tire pyrolysis. *Bulletin of RUDN University*, 2015, no. 4, pp. 80–83 (in Russian).
9. Popov V. S., Papin A. V., Ignatova A. Yu. Analysis of the possibility of obtaining briquetted fuel from tire pyrolysis waste using a binder – a secondary polymer. *Bulletin of KuzGTU*, 2016, no. 1, pp. 172–177 (in Russian).
10. Papin A. V., Ignatova A. Yu., Makarevich E. A., Nevedrov A. V. Obtaining composite fuel based on carbon black by tire pyrolysis. *Bulletin of KuzGTU*, 2015, no. 2, pp. 107–113 (in Russian).

References

1. Vetoshkin A. G. *Tekhnologii zashchity okruzhayushchey sredy ot otkhodov proizvodstva i potrebleniya: uchebnoye posobiye* [Technologies for protecting the environment from production and consumption waste: a study guide]. St. Petersburg, Lan', 2016. 304 p. (in Russian).
2. Ulanova O. V., Salhofer S. P., Vyunsh K. *Kompleksnoye ustoychivoye upravleniye otkhodami. Zhilishchno-kommunal'noye khozyaystvo: uchebnoye posobiye* [Integrated sustainable waste management. Housing and communal services: textbook]. Moscow, Publish-

Поступила в редакцию 29.03.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 25.04.2023
The article was submitted 29.03.2023; approved after reviewing 18.04.2023; accepted for publication 25.04.2023