

БИОКОКС ИЗ ИЛОВОГО ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД – ЭФФЕКТИВНЫЙ СУБСТРАТ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО И ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЧВ

Макоев С.О., Ахметова И. Г.

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
MakoevSO@mpei.ru**

Резюме: Очистка сточных вод и утилизации отходов сорбентов, полученных из остаточной биомассы. Получение биококса из илового осадка. Обеспечение максимальной теплоты сгорания сырья. **МЕТОДЫ.** Рентгенофазовый анализ золы после сжигания отработанных сорбентов. Термогравиметрический анализ биококса в окислительной среде. Оценка элементного анализа исходного сырья и продуктов термической конверсии ТКО. Экспериментальный анализ морфологического состава ТКО для муниципального округа. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведены экспериментальные исследования по анализу илового осадка сточных вод и проведена оценка по энергетическим и экологическим показателям. Выполнено обоснование возможности частичного замещения ископаемого топлива посредством использования ТКО при производстве тепловой энергии. Приведена схема очистки сточных вод и использования отработанных сорбентов в качестве топлива. Для уточнения теплоты сгорания были проведены эксперименты в калориметрической бомбе, которые показали, что биококс имеет низшую теплоту сгорания равную 11,5 МДж/кг. Получена теплота сгорания биококса по данным термоанализатора, которая составляет 8–12 МДж/кг и зависит как от типа исходного осадка сточных вод, так и от режима подготовки биококса. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты позволяют оценить эффективность применения биококса, полученного из осадочных сточных вод, для последующего применения для обеззараживания полигонов ТКО и влияние для восстановления качества почв.

Ключевые слова: биококс; обеззараживание полигонов; переработка илового осадка; сточные воды; утилизация ТКО.

Для цитирования: Макоев С.О., Ахметова И. Г. Биококс из илового осадка сточных вод – эффективный субстрат для обеззараживания полигонов ТКО и восстановления качества почв // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 153-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-153-164.

BIOCOKE FROM WASTEWATER SLUDGE IS AN EFFECTIVE SUBSTRATE FOR DISINFECTING MSW POLYGONS AND RESTORE SOIL QUALITY

SO. Makoev, IG. Akhmetova

**National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
MakoevSO@mpei.ru**

Abstract. THE PURPOSE. Wastewater treatment and waste disposal of sorbents obtained from residual biomass. Obtaining biocoke from sludge. Ensuring maximum calorific value of raw materials. **METHODS.** X-ray phase analysis of ash after burning spent sorbents. Thermogravimetric analysis of biocoke in an oxidizing environment. Elemental analysis evaluation of raw materials and products of municipal solid waste thermal conversion. Experimental analysis of municipal solid waste morphological composition for the municipal district. **RESULTS.** Completed experimental studies on the analysis of sewage sludge and an assessment on energy and environmental indicators. The substitution of partial replacement of fossil fuels by using municipal solid waste in thermal energy generation. Scheme of wastewater

treatment and application of used sorbents as fuel. In order to clarify the calorific value, experiments were made in a calorimetric bomb which showed that biocoke has a lower calorific value of 11.5 MJ/kg. The calorific value of biocoke was obtained according to the data of a thermal analyzer, which is 8–12 MJ/kg and depends both on the type of initial sewage sludge and on the mode of biocoke preparation. CONCLUSION The obtained results make possible to evaluate the effectiveness of biocoke usage obtained by conversion of sewage sludge for the disinfection of MSW landfills and the impact on restoring soil quality.

Keywords: *biocoke; landfill decontamination; sludge processing; wastewater; solid waste disposal.*

For citation: Makoev SO, Akhmetova IG. Biocoke from wastewater sludge is an effective substrate for disinfecting msw polygons and restore soil quality. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):153-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-153-164.

Введение

Исторически остроту проблемы с утилизацией илового осадка сточных вод и твердых коммунальных отходов (ТКО) ощутили те регионы, где ускоренный рост городов и промышленности проходил на географически ограниченных территориях – в центральной части Западной Европы (Германия, Австрия, Швейцария, Нидерланды). Именно в этих странах началась выработка концепций в управлении гигантскими потоками городских отходов. В России негативные последствия неуправляемого кризиса в области ТКО первыми ощутили крупные города и промышленные регионы: Москва и Московская область, Санкт-Петербург, Урал.

Результаты попыток управления этим кризисом пока неудовлетворительны. Так, за последние 5 лет объем генерируемых в столице бытовых отходов вырос на 12,5%. Из них только 10% перерабатывается в сырье для новой продукции и энергию, остальные 90% вывозятся на свалки и полигоны, расположенные в Московской области. Каждый день из столицы вывозится 9,5 тысячи тонн ТКО. Московская область, в которой проживает около 5% населения России, размещает у себя 20% всех отходов России. Эта гигантская экологическая нагрузка продолжает расти и наносит большой вред здоровью населения и многим областям сельского хозяйства, промышленности и туризма.

В данной работе поставлена задача по оптимальной переработке илового осадка сточных вод в биококс для применения на полигонах ТКО, в том числе оценка элементного анализа исходного сырья и продуктов термической конверсии ТКО.

Научная новизна заключается в получении энерго- и ресурсосберегающей технологии, включающие в себя: использования отходов для получения сорбентов для очистки СВ; утилизацию отработанных сорбентов в качестве топлива, применения золы, после сжигания отработанных сорбентов как добавку для органоминерального удобрения почв.

Литературный обзор

Аналогичные проблемы с оптимальной утилизацией наблюдаются и для илового осадка водоочистных сооружений (ОСВ). На каждый миллион жителей на станциях водоочистки ежегодно генерируется 150–200 тыс. тонн влажного ОСВ, или 30 тыс. тонн в сухом весе.

В настоящее время в мире одним из наиболее перспективных методов переработки отходов лесного, сельского, городского и ряда других видов хозяйств является пиролиз с целью дальнейшего использования в различных сферах полученных материалов. Категория углеродосодержащих материалов, получаемых при переработке органических отходов природного происхождения методом пиролиза, в зарубежной практике носит обобщающее название биококс. В числе отходов, перерабатываемых с целью получения биококса, можно назвать осадок сточных вод, опилки, стружки, древесную щепу, кору, солому, шелуху различных с/х культур, ветки и пр. Получаемый биококс (рис. 1) может использоваться в различных сферах: в качестве сорбента, в качестве почвенного субстрата для ремедиации загрязнённых почв и полигонов бытовых отходов, для улучшения характеристик бедных почв, в городском хозяйстве для нужд озеленения, при борьбе с опустыниванием и эрозией почв, при выращивании технических видов культур и пр.

В международной практике наиболее выгодным для переработки в биококс с точки зрения характеристик исходного сырья рассматривается осадок сточных вод вследствие изначально высокого в нём содержания фосфора (до 18%) и азота (до 20%). Переработка

ОСВ с целью получения биококса, кроме получения достаточно востребованного продукта, позволяет обеспечить полную утилизацию (переработку) ОСВ. При этом ОСВ содержит патогенную микрофлору, канцерогенные вещества, ксенобиотики, тяжёлые металлы, в связи с чем его утилизация представляет из себя отдельную проблему. Касательно технологий переработки ОСВ важно отметить, что на настоящий момент экономически рентабельных методов его переработки в полезный продукт не существует, в связи с чем происходит его затратная утилизация. По оценкам зарубежных специалистов, на сегодняшний день переработка ОСВ в биоккок является одним из наиболее перспективных способов его использования [1].



Рис. 1. Биоккок, полученный из осадка сточных вод

Fig. 1. Biocoke gained from sewage sludge

Применение биококка, получаемого из ОСВ, имеет ряд особенностей. Так, на характеристики конечного продукта оказывают существенное влияние ряд факторов, которые необходимо учитывать уже на этапе разработки технологических процессов:

- характеристики исходного сырья (химический состав самого ОСВ, в т. ч. процент содержания фосфора и азота, наличие песка и иных минеральных загрязнений и пр.);
- степень износа очистных сооружений, где планируется осуществить установку оборудования для переработки ОСВ в биоккок;
- особенности технологического процесса и оборудования, применяемые для получения биококка;
- планируемая сфера применения биококка.

Так в зависимости от области применения биококка подбирается температурный режим пиролиза. На рис. 2 показано изменение структуры материала в зависимости от температурных условий [2].

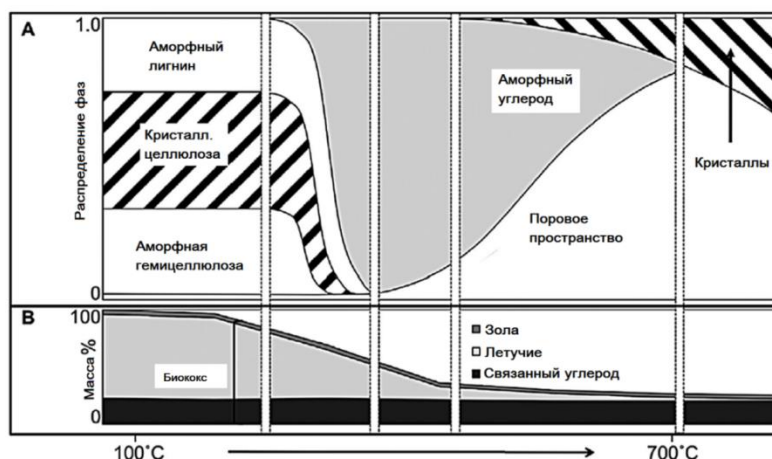


Рис. 2. Изменение структуры биококка в зависимости от температуры пиролиза

Fig. 2. Changes in biocoke structure depending on pyrolysis temperature

Среди перспективных направлений использования биококка, получаемого, можно выделить борьбу с опустыниванием и эрозией почвенного слоя [3 – 5]. Внесение биококка при опустынивании (значительном уменьшении продуктивности почвы вплоть до снижения урожайности до уровня сорняков) позволяет увеличить влагозадержание за счёт пористости субстрата, увеличение доли доступных фосфатов для питания корневой системы растений и

обеспечивает создание условий для образования гумуса. В случае эрозии – нарушении поверхностного почвенного слоя за счёт ветрового и водного воздействия, результатом которой является появление оврагов, разрушение профилей насыпей и склонов: при внесении биококса формируется эрозионно-устойчивый верхний почвенный слой, улучшается структура почвы, происходит ускоренное произрастание трав и кустарников, в результате чего поверхность почвы укрепляется их корнями.

На сегодняшний день существует достаточное количество методов по переработке и утилизации отходов. Данные методы делятся на две основные группы: нетермические и термические (рис. 3).

К нетермическим методам относят захоронение, компостирование и вторичную переработку отходов [6, 7]. Под термическими методами понимается высокотемпературное воздействие на ТКО, при этом всегда жидкая фаза – физическая вода испаряется, твердая фаза неорганической субстанции претерпевает структурные превращения: дегидратация, диссоциация, полиморфизация, плавление, испарение [8 - 11].

Материалы и методы

Объем накопленных ТКО в России составляет около 80-100 млрд. тонн (бытовые отходы, изношенные шины, шлаки металлургических производств, отходы обогащательных фабрик и др.). Несмотря на это, в настоящее время около 90 % мусора вывозится на свалки и полигоны. Утилизируется не более 10 % ТКО, из которых около 3 % сжигается и 7 % - поступает на промышленную переработку. Накопление мусора в современных городах составляет более 300 кг на 1 человека в год при ежегодном росте этого количества 4-6 %.

Для утилизации ОСВ также разработаны различные технологии, которые отличаются как капитальными затратами, так и экологическими показателями. В табл. 1 представлены основные способы утилизации ОСВ.

Табл. 1.

Современные способы утилизации ОСВ

Способ	Особенности	Недостатки
Вывоз на поля	Использование фосфора, стабильный спрос во многих странах	Правовые барьеры, нежелание фермеров, логистика, хранение в межсезонный период
Компостирование	Дешевый и простой способ	Хранение, низкая скорость переработки, нет рекуперации энергии
Анаэробное сбраживание	Получение энергии, производство компоста	Низкая энергоэффективность, токсичность компоста
Сжигание	Получение энергии, снижение объема отходов, широкое распространение	Высокие капитальные затраты, токсичность золы, требуется газоочистка
Сушка	Снижение объема отходов, на выходе сухой материал	Высокие капитальные затраты, низкая энергоэффективность, токсичность
Сушка-пиролиз-газификация	Высокая энергоэффективность, рециклинг фосфора, экологическая чистота удобрений	Высокие капитальные затраты, технологии только начинают развиваться

Что касается органической субстанции, то в зависимости от способа температурного воздействия она может окисляться (сжигание), распадаться (пиролиз), газифицироваться (газификация). Применение тех или иных способов переработки отходов связано, в первую очередь, с технологической освоенностью используемого метода и экономическими затратами на его реализацию. От применения конкретного способа также зависит эффективность переработки отходов.

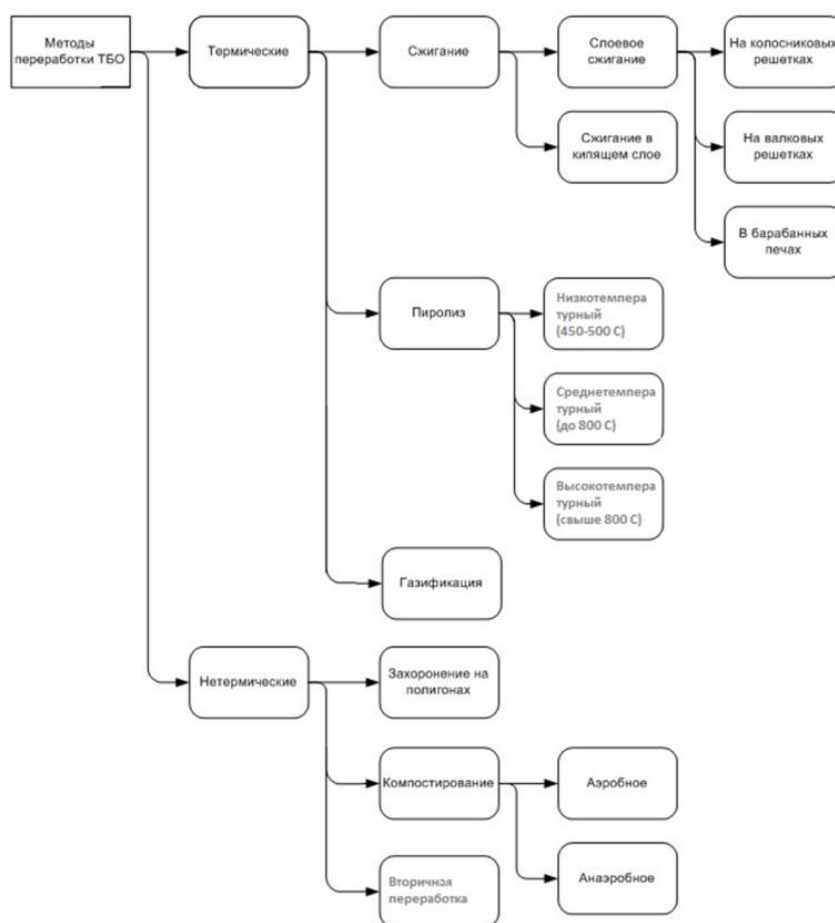


Рис. 3. Основные методы утилизации ТКО

Fig. 3. Basic methods of TKO disposal

Как следует из табл. 1, каждый способ имеет как свои положительные, так и отрицательные стороны. Однако только термическая переработка ОСВ (сушка-пиролиз-газификация) позволяет раскрыть потенциал биококса для комплексного решения обеих проблем управления самыми большими потоками городских отходов. В отличие от других технологий в данном случае предлагается переработка ОСВ в коммерчески востребованный продукт, а не его затратная утилизация. При этом в зависимости от планируемой сферы применения качественные характеристики биококса должны оптимизированы для решения конкретных задач [12].

Целевые задачи при переработке ОСВ в биококс для применения на полигонах ТКО заключаются в следующем:

- обеспечение содержание углерода не менее 25%;
- обеспечение размера пор от 5 до 50 мкм.

Преимущества использования биококса:

- удержание тепличных газов (метана, оксидов углерода и пр.) в теле полигона для дальнейшего их разложения почвенными бактериями;
- удержание токсичных жидкостей в теле полигона;
- снижение уровня неприятных запахов;
- предотвращение пожаров за счет удержания и связывания метана.

Биококс представляет собой углеродсодержащий компонент с теплотой сгорания на уровне торфа или древесины. Основные его характеристики: высокая концентрация чистого углерода С (не менее 15–30% от общей массы биококса) при низком содержании водорода Н ($H/C \leq 0,2$), практическое отсутствие органических токсичных веществ (например, полиароматических углеводородов), высокая пористость (около 40%), транспортная прочность (около 1,0 МПа).

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям (рис. 4), теплота сгорания биококса по данным термоанализатора составляет 8 – 12 МДж/кг и зависит как от типа исходного ОСВ, так и от режима подготовки биококса. Важно отметить, что сырье

начинает воспламеняться при температуре 320-350 °С, что позволяет избежать плавления или уноса минеральных составляющих образца. Данная особенность существенно снижает затраты на очистку дымовых газов и утилизацию золы.

Для уточнения теплоты сгорания были проведены эксперименты в калориметрической бомбе, которые показали, что биококс имеет низшую теплоту сгорания равную 11,5 МДж/кг.

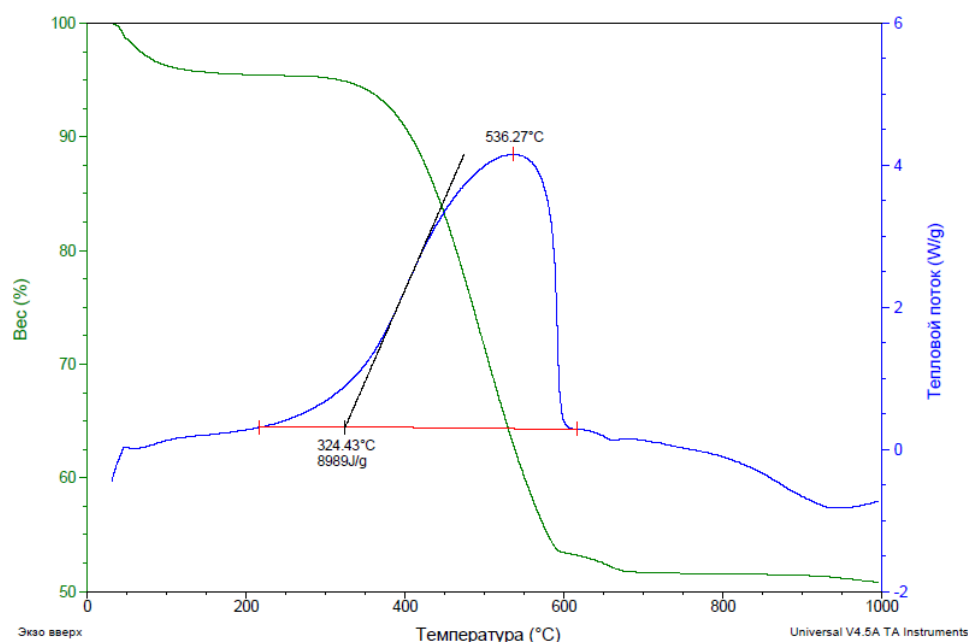


Рис. 4. Термогравиметрический анализ биококса в окислительной среде

Fig. 4. Thermogravimetric analysis of biocoke in oxidative medium

С другой стороны, более 90% всех топливно-энергетических ресурсов страны используется для непосредственного сжигания в энергетических, промышленных и транспортных установках. Сжигание топлива в этих установках неизбежно связано с образованием и выбросом вредных веществ и парниковых газов в окружающую среду. По этой причине могут быть рассмотрены альтернативные более экологичные способы термической конверсии биококса в энергетических целях, такие как газификация. Процесс газификации зависит от многих факторов, влияющих на состав получаемого газа и его теплоту сгорания (вид дутья, давление, температура, размер частиц, способ подвода тепловой энергии и выведения продуктов).

Целевая задача при переработке ОСВ в биококс для применения в качестве альтернативного органического топлива заключается в следующем:

- обеспечение максимальной теплоты сгорания сырья.

Преимущества использования биококса:

- отсутствие необходимости строительства илосжигающих заводов;
- отсутствие необходимости дорогостоящей очистки дымовых газов благодаря сравнительно невысокой температуре воспламенения, что позволяет избежать унос тяжелых металлов;
- возможность длительного хранения сырья.

В качестве подтверждения востребованности ремедиации почв можно представить следующие данные по одному из регионов России: около 5% территории Московской области, что составляет 2 200 км², имеет кризисную степень загрязнения (рис. 5).

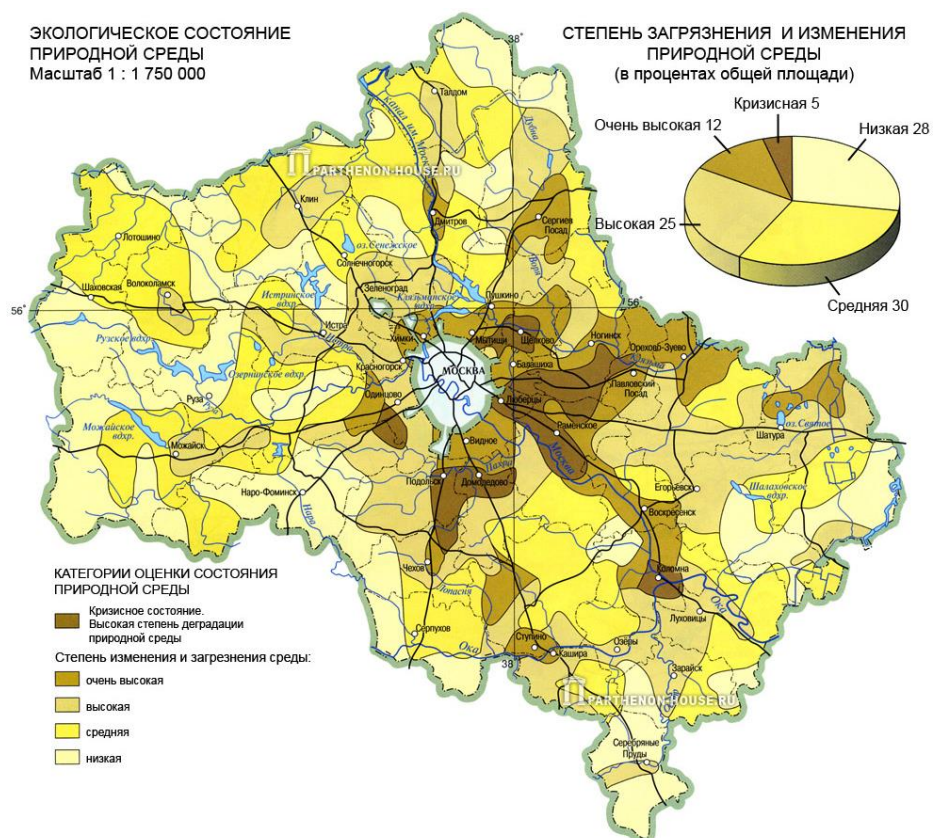


Рис. 5. Экологическое состояние
природной среды Московской области

Fig. 5. Ecological state of the natural
environment of the Moscow region

Необходимо учитывать, что на территорию Московской области вывозится для дальнейшего захоронения около 90% мусора, образующегося на территории г. Москвы, в связи с чем описанная ситуация может оказаться нетипичной для некоторых регионов России. Однако, на территории других регионов присутствуют свои источники заражения почв: промышленные предприятия, несанкционированные свалки, выработавшие свой срок свалочные полигоны и иные подобные объекты.

Целевые задачи при переработке ОСВ в биокос для применения в качестве почвенного сорбента заключаются в следующем:

- обеспечение доступности фосфора и азота для растений;
- обеспечение содержание углерода не менее 25%;
- обеспечение размера пор от 30 до 50 мкм.

Преимущества использования биокоса:

- возможность использования для нужд городского хозяйства (обсыпка обочин, парковые и ландшафтные работы, газоны, выращивание технических культур и пр.);
- восстановление и улучшение качества почв;
- минимальный уровень потерь фосфора при его вымывании естественными осадками;
- накопление и удержание почвенной влаги;
- ускоренное образование гумуса.

Среди перспективных направлений использования биокоса, получаемого из ОСВ, можно выделить борьбу с опустыниванием и эрозией почвенного слоя. Вопросы применения биокоса в качестве почвенного субстрата впервые стали рассматриваться в 1998 году для восстановления пустынных земель в Африке. Однако, главной проблемой применимости были высокие сроки окупаемости установки в сравнении с конкурентными технологиями производства удобрений.

Внесение биокоса при опустынивании (значительном уменьшении продуктивности почвы вплоть до снижения урожайности до уровня сорняков) позволяет увеличить влагозадержание за счёт пористости субстрата, увеличение доли доступных фосфатов для питания корневой системы растений и обеспечивает создание условий для образования гумуса. В случае эрозии - нарушении поверхностного почвенного слоя за счёт ветрового и водного воздействия, результатом которой является появление оврагов, разрушение профилей насыпей и склонов, - при внесении биокоса формируется

эрозионно-устойчивый верхний почвенный слой, улучшается структура почвы, происходит ускоренное произрастание трав и кустарников, в результате чего поверхность почв укрепляется их корнями.

Для улучшения качества почвы соответствующие субстраты следует вносить в верхний плодородный слой глубиной 0,3 м в количестве примерно 10–15% от его объема, т. е. при удельном весе биококка $0,8 \text{ г/см}^3$ на один квадратный метр требуется вносить 24–36 кг биококка. Следовательно, с помощью биококка, получаемого в течение года в городе-миллионнике, можно ежегодно улучшать 45–55 га городских территорий с неудовлетворительным состоянием почвенного покрова (плохая водо- и воздухопроницаемость и, соответственно, глубокое промерзание в зимний период и затопляемость в период дождей, недостаточное количество трав и декоративных культур и пр.), а в городе с населением 10 млн человек (Москва) – до 550 га/год.

В тоже время внесение биококка в почву позволяет снизить эмиссию углекислого газа в атмосферу. Как известно, растения в процессе фотосинтеза поглощают CO_2 для применения атома углерода в своей полимерной структуре. Обратный процесс разложения органического вещества неминуемо сопровождается выделением CO_2 в атмосферу. Различные исследования показывают, что переработка растительных отходов в биококк позволяет существенно снизить скорость эмиссии CO_2 благодаря более стабильной структуре материала (рис. 6).

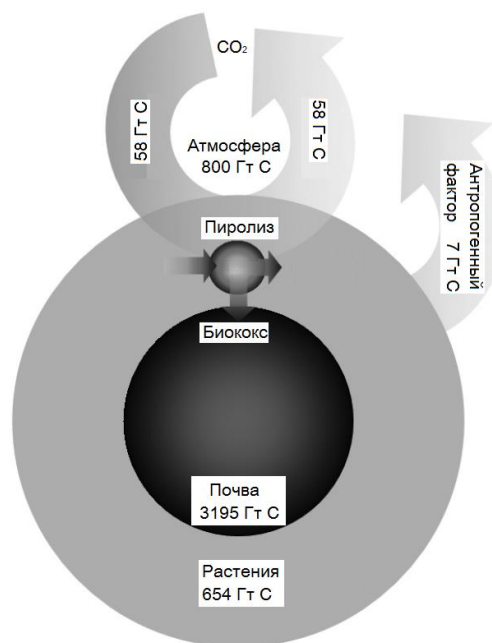


Рис. 6. Годовой цикл углерода на планете [13]

Fig. 6. The annual carbon cycle on the planet [13]

Результаты и обсуждения

В мировой научной литературе встречается немало количество статей, посвященных как вопросам получения биококка, так и его эффективного использования. В Китае [14] проводятся работы по оценке эффекта от внесения биококка, полученного из различных органических материалов, в верхние слои почвы в качестве удобрения. При этом проводится сравнительный анализ биококка с минеральными удобрениями, а также с различными смесями на их основе.

На рис. 7 показаны снимки структуры биококка из бамбука за время проведения экспериментальных исследований. Согласно статистическим данным, период эффективного использования биококка в почве составляет 1,5 – 2,0 года. По истечении данного времени требуется дополнительное внесение компонента в грунт.

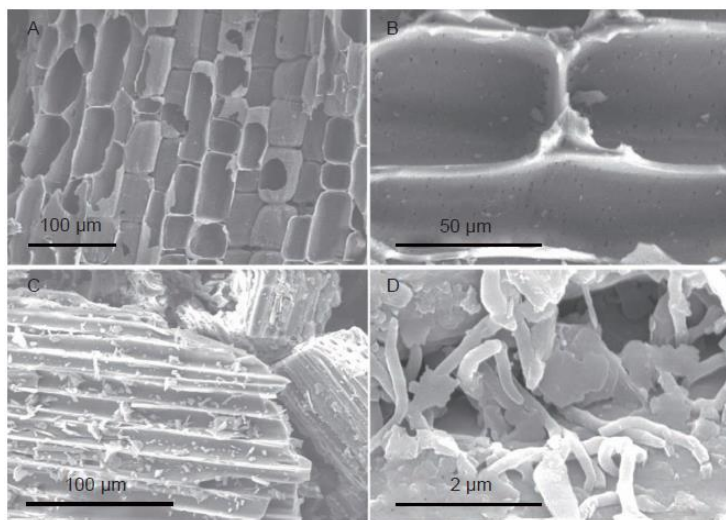


Рис. 7. Изменение структуры биококка до (А, В) и после проведения эксперимента (С, D) по внесению в почву сроком на 1,5 года

Fig. 7. Restructuring of biocoke before (A, B) and after the 1.5 year (C, D) soil application

Среди выявленных положительных эффектов применения биококка исследователи отметили:

- увеличение содержания фосфора и калия в почве;
- ускорение катионного обмена;
- увеличение показателя pH;
- рост количества и повышение активности микроорганизмов;
- повышение урожайности почвы.

В Пакистане проводились исследования влияния биококка, полученного из навоза и птичьего помета на рост кукурузы и пшеницы [15]. В данном регионе наблюдается низкое содержание органических веществ в почве, что создает значительную угрозу плодородию почв, урожайности и экономической целесообразности сельского хозяйства в засушливых и полувзасушливых экосистемах. По этой причине биоккок становится привлекательным вариантом для использования в качестве удобрения. Авторы работы провели двухлетние полевые эксперименты по выращиванию кукурузы и пшеницы в 2015 и 2016 годах, чтобы проверить влияние биококка на урожайность, свойства почв и эффективность фосфорного обмена в сравнении с традиционными минеральными удобрениями.

Интересно, что помимо ценового преимущества в виде низкой себестоимости, вариант с внесением биококка показал наилучшие показатели с точки зрения урожайности (рис. 8).

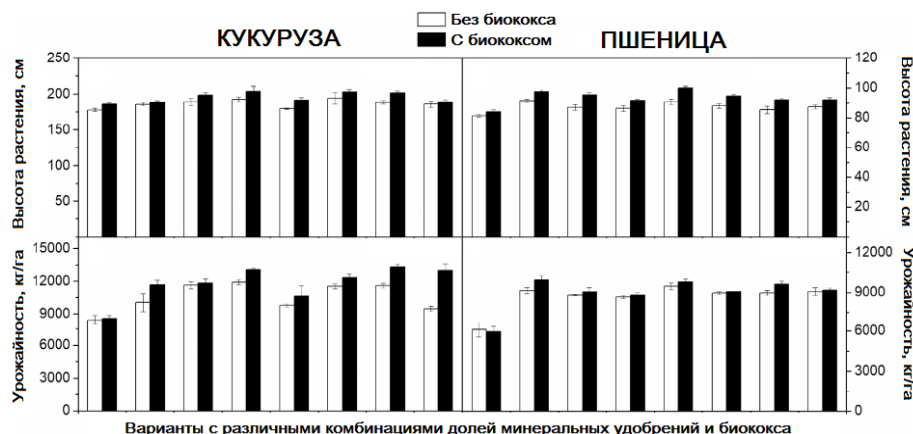


Рис. 8. Влияние биококка на урожайность кукурузы и пшеницы

Fig. 8. Influence of biocoke on maize and wheat yield

Специалисты из США и Катар пытаются решить комбинированную задачу переработки ТКО в биоккок с последующим его применением для ремедиации почв [16]. Для обеспечения экологической и экономической стабильности крупных городов необходимо

разработать новые способы эффективной утилизации ТКО. Биоккок является перспективным направлением с точки зрения обращения с ТКО, обеспечения цикличности углерода в природе и ремедиации пораженных почв. Специалистами рассмотрены вопросы получения биоккока из газет, картонов, древесной щепы и растительных отходов по отдельности или в смесях с равными массовыми долями. Эксперименты проводились при трех температурах пиролиза (350, 500, и 750 °C) и при разном времени пребывания в реакторе (2, 4 и 6 часов). При этом наблюдаются изменения ключевых свойств биоккока, таких как pH, электропроводность, плотность, удержание воды, доля микроэлементов в зависимости от сырья и условий производства. Кроме того, увеличение температуры пиролиза и времени нахождения в реакторе резко уменьшает массовую долю биоккока, полученного из смеси ТКО (рис. 9).

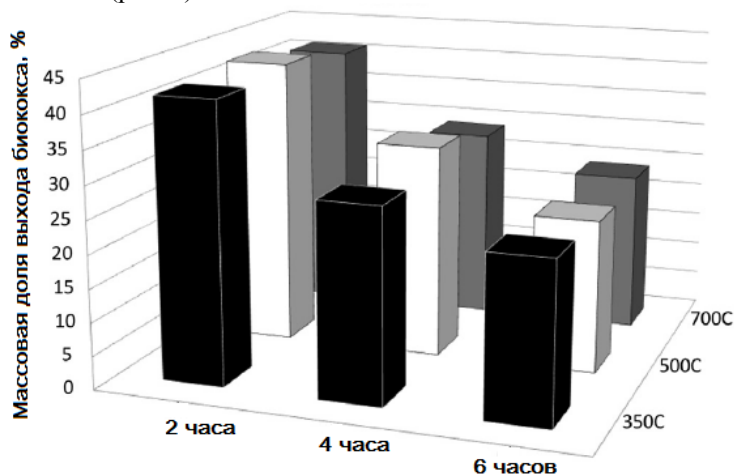


Рис. 9. Зависимость выхода биоккока из ТКО от температуры и времени реакции

Fig. 9. Dependence of biocoke output from TKO on temperature and reaction time

Установлено, что повышение температуры пиролиза приводит к росту пористости поверхности биоккока, величины pH и электрической проводимости. Что касается ремедиации почвы, то авторы исследования подчеркивают снижение содержания кальция, калия и магния в грунте при увеличении количества азота и фосфора.

Представленный обзор доказывает высокую актуальность применения биоккока благодаря широкому спектру проблем, решаемых с помощью данного продукта.

Современные очистные сооружения ежегодно генерируют около 30–35 кг ОСВ в сухом остатке (равнозначно порядка 150–180 кг ОСВ с влажностью 80%) на каждого городского жителя. Массово применяемые в настоящее время в мире технологии (сушка и складирование, сжигание, захоронение на полигонах и пр.) позволяют обеспечить исключительно утилизацию ОСВ, а не его переработку или иное экономически эффективное использование. Предлагаемые способ и технология обеспечивают не просто утилизацию ОСВ, но и его переработку с получением коммерчески востребованного продукта.

Представленная задача по внедрению экологически и экономически эффективного способа утилизации ОСВ предопределяет комплексный подход, для успешного осуществления которого необходимо проведение исследований сразу по трём основным направлениям:

- влияние характеристик исходного сырья на конечные характеристики биоккока;
- влияние режимов пиролиза на конечные характеристики биоккока;
- моделирование в лабораторных условиях природных процессов, которые бы позволили оценить влияние биоккока на процессы ремедиации загрязнённых земель и свалочных полигонов с целью поиска оптимальных характеристик биоккока, который бы стал наиболее эффективным для решения данной задачи.

Литература

1. Бутусов М.М., Комаров А.Ю., Писаренко С.С., Кудерна М., Поллак М. Безотходная переработка илового осадка канализационных очистных сооружений – производство биоккока // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 8. С. 47–51.

2. Novotny E.H., Maia C.M., Carvalho M.T., Madari B.E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review // R. Bras. Ci. Solo, 39:321-344, 2015.
3. Jing Q., Fernandes de Souza M., Robles-Aguilar A., Ghysels S., Sik Ok Y., Ronsse F., Meers E. Improving biochar properties by co-pyrolysis of pig manure with bio-invasive weed for use as the soil amendment, Chemosphere, Volume 312, Part 1, 2023, 137229.
4. Zhang R.-H., Xie Y., Zhou G., Li Z., Ye A., Huang X., Xie Y., Shi L., Cao X., Zhang J., Lin C. The effects of short-term, long-term, and reapplication of biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil, Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 248, 2022, 114316.
5. Тимербаев Н.Ф., Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Китаев С.В. Технология и оборудования для электроэнергетического использования древесных отходов. известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(1-2):102-107.
6. Politaeva N., Smyatskaya Y., Fedyukhin A. Fiber and carbon materials for wastewater purification from petroleum products. Desalination and Water Treatment, 174 (2020) P. 116-122.
7. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;(7-8):26-36.
8. Савина М.В., Тимофеева С.С. Разработка схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ // Вестник КГЭУ, 2021, том 13, № 2 (50).
9. Анализ возможности использования биоугля в металлургическом производстве / А. В. Карпов, А. О. Диментьев, Д. С. Шмарин, Т. В. Цымбал // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 1(47). – С. 69-76.
10. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(6):68-78.
11. Рижия, Е. Я. Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности / Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов // Агрохимия. – 2020. – № 8. – С. 22-29.
12. Крылова, А. Ю. Получение биоугля пиролизом биомассы / А. Ю. Крылова, Е. Г. Горлов, А. В. Шумовский // Химия твердого топлива. – 2019. – № 6. – С. 55 – 64.
13. Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. V. 11, PP. 403–427.
14. He Li-li, Zhong Zhe-ke, Yang Hui-min Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers // Journal of Integrative Agriculture 2017, 16(3): 704–712.
15. Muhammad Arif, Muhammad Ilyas, Muhammad Riaz, Kawsar Ali, Kamran Shah, Izhar Ul Haq, Shah Fahad Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil // Field Crops Research 214 (2017) 25 – 37.
16. P. Randolph, R.R. Bansode, O.A. Hassan, Dj. Rehrah, R. Ravella, M.R. Reddy, D.W. Watts, J.M. Novak, M. Ahmedna Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters // Journal of Environmental Management 192 (2017) 271 – 280.

Авторы публикации

Султан Олегович Макоев – директор дирекции международного образования Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.

Ирина Гареевна Ахметова – др. техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям Казанского государственного энергетического университета, Казань, Россия.

References

1. Butusov MM, Komarov AYU, Pisarenko SS, et al. Waste-free processing of sludge from sewage treatment plants - production of biocox. *Water supply and sanitary equipment*. 2017;8:47-51.
2. Novotny EH, Maia CM, Carvalho MT, et al. *Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review*. R. Bras. Ci. Solo, 39:321-344, 2015.
3. Jing Q, Fernandes de Souza M, Robles-Aguilar A. Improving biochar properties by co-pyrolysis of pig manure with bio-invasive weed for use as the soil amendment, Chemosphere. V. 312, Part 1, 2023, 137229.

4. Zhang R.-H, Xie Y, Zhou G, et al. The effects of short-term, long-term, and reapplication of biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 202;248:114316.
5. Timerbaev NF, Tuntsev DV, Khairullina MR, et al. Technologies and equipment for the production of electricity from wood waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(1-2):102-107.
6. Politaeva N, Smyatskaya Y, Fedyukhin A. Fiber and carbon materials for wastewater purification from petroleum products. *Desalination and Water Treatment*, 174 (2020) P. 116-122.
7. Afanaseva OV, Mingaleeva GR, Dobronravov AD, et al. Complex use of ash and slag waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26-36.
8. Savina MV, Timofeeva SS. Development of a scheme for using generator gas from low-grade coal in PSU. *Vestnik KGEU*, 2021;13(2 (50)).
9. Karpov AV, Dimentiev AO, Shmarin DS. Analysis of the possibility of using bio-coal in metallurgical production. Tsybal. *Bulletin of the Lipetsk State Technical University*. 2022;1(47):69-76.
10. Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):68-78.
11. Rizhiya EYa, Buchkina NP, Balashov EV. The influence of bio-coal on the content of mineral forms of nitrogen in sod-podzolic sandy loam soil with different degrees of cultivation. *Agrochemistry*. 2020;8:22-29.
12. Krylova AYU, Gorlov EG, Shumovsky AV. Obtaining bio-coal by pyrolysis of biomass. *Chemistry of solid fuels*. 2019;6:55-64.
13. Lehmann J, Gaunt J. and Rondon, M. (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006;11:403–427.
14. He Li-li, Zhong Zhe-ke, Yang Hui-min Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers. *Journal of Integrative Agriculture* 2017;16(3):704–712.
15. Muhammad Arif, Muhammad Ilyas, Muhammad Riaz, Kawsar Ali, Kamran Shah, Izhar Ul Haq, Shah Fahad Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. *Field Crops Research* .214 (2017) 25 – 37.
16. P. Randolph, R.R. Bansode, O.A. Hassan, et al. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. *Journal of Environmental Management*. 192(2017) 271-280.

Authors of the publication

Sultan O. Makoev – Director of International Education Department, National Research University «MPEI».

Irina G. Akmetova – Vice-Rector for Development and Innovation, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 28.11.2022г.

Отредактировано 05.12.2022г.

Принято 05.12.2022г.