

УДК 631.95

UDC 631.95

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, Machinery, and Equipment for the Agro-Industrial Complex (Engineering Sciences)

ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

AGRICULTURAL WASTE PROCESSING

Тимербаев Наиль Фарирович
д.т.н, профессор

Timerbaev Nail Farilovich
Doctor of Engineering, Professor

Родионов Алексей Сергеевич
Аспирант, ассистент

Rodionov Aleksey Sergeyevich
Postgraduate Student, Assistant Professor

Степанова Татьяна Олеговна
к.т.н, доцент

Stepanova Tatyana Olegovna
Candidate of Engineering, Associate Professor

Сафин Рушан Гареевич
д.т.н, профессор
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Safin Rushan Gareevich
Doctor of Engineering, Professor
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

В статье представлены результаты исследования переработки сельскохозяйственных отходов, актуальность которого обусловлена ростом их объемов и негативным воздействием на окружающую среду. Разработана классификация отходов по происхождению и составу, включая смешанные (растительные, животные и неприродные компоненты). Показано, что наиболее эффективны термохимические методы — пиролиз, газификация и активация угля. Лабораторные испытания подтвердили возможность получения до 30% биоугля из смеси, содержащей 80% агропромышленных отходов (кожуха льна, лузга подсолнечника) и 20% упаковочной бумаги. Полученный биоуголь обладает высокой пористостью и прочностью, что позволяет использовать его как почвоулучшитель, адсорбент или топливо. Разработана непрерывно действующая установка с системой рекуперации тепла, снижающей энергозатраты. Технология обеспечивает не только утилизацию отходов, но и производство ценных продуктов — биоугля, синтез-газа и жидких фракций, способствуя устойчивому развитию АПК и снижению экологической нагрузки.

This article presents the results of a study on agricultural waste recycling, the relevance of which is due to its increasing volume and negative impact on the environment. A classification of waste by origin and composition has been developed, including mixed waste (plant, animal, and non-natural components). Thermochemical methods—pyrolysis, gasification, and charcoal activation—are shown to be the most effective. Laboratory tests confirmed the possibility of producing up to 30% biochar from a mixture containing 80% agro-industrial waste (flax shives, sunflower husks) and 20% packaging paper. The resulting biochar is highly porous and durable, allowing it to be used as a soil conditioner, adsorbent, or fuel. A continuously operating unit with a heat recovery system, reducing energy costs, has been developed. The technology not only ensures waste disposal, but also the production of valuable products—biochar, synthesis gas, and liquid fractions—promoting sustainable development of the agro-industrial complex and reducing environmental impacts.

Ключевые слова: СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, ОТХОДЫ, ПЕРЕРАБОТКА, ПИРОЛИЗ

Keywords: AGRICULTURE, WASTE, RECYCLING, PYROLYSIS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-213-023>

Введение.

Население мира выросло с 3,7 миллиарда человек в 1970 году до 7,9 миллиарда в 2024 году. По прогнозам, к 2050 году их количество достиг-

<http://ej.kubagro.ru/2025/09/pdf/23.pdf>

нет 9 миллиардов, а к 2100 году - 11 миллиардов. Для удовлетворения возрастающих потребностей миллионов людей произошло значительное увеличение объемов выращивания сельскохозяйственных культур и поголовья скота, что способствует образованию большего количества сельскохозяйственных отходов.

Большая часть этих отходов сжигается или захоранивается, усиливая нагрузку на окружающую среду, вплоть до негативного воздействия на почву, воздух и водные ресурсы. Это, в свою очередь, оказывает влияние на здоровье населения и устойчивость экосистем, подвергая их риску.

С другой стороны, сельскохозяйственные отходы являются ценным вторичным сырьем и могут быть реализованы в различных областях промышленности: при производстве кормов, удобрений, топлива, строительных материалов и т.д.

Для превращения отходов в доходы необходимо интенсивно внедрять рациональные технологии их переработки. Для решения этих задач необходимо систематизировать источники образования сельскохозяйственных отходов, методы их переработки с преимуществами и недостатками и рекомендовать эффективные способы утилизации отходов [2].

Образующиеся сельскохозяйственные отходы по происхождению разделяются на природные и не природные.

Отходы природного происхождения в свою очередь делятся на растительные и животные, которые формируют агропромышленные отходы.

Растительные отходы образуются непосредственно на сельскохозяйственных полях, они классифицируются на отходы: зерновых, зернобобовых и технических культур, садоводства, овощеводства и тд. Количество растительных отходов растет пропорционально валовому сбору сельскохозяйственных культур.

Анализ литературных данных показывает, что к 2025 году производство растительных культур в России ожидается на уровне 245,3 млн тонн в год.

Принимая во внимание, что при обработке зерновых культур образуется до 70 % отходов от общей массы сырья, то можно сделать вывод, что в настоящее время в России образуется примерно 99,82 млн тонн растительных остатков в год [3].

Аналогичный рост происходит с отходами животного происхождения. Объемы образования навоза и помета в России достигли критических значений, только за прошлый год компании отчитались о 286 млн тонн сгенерированного навоза и помета. В них входят 217 млн т/год навоза крупного скота, 46 млн т/год свиного помета, 17 млн т/год птичьего помета и 6 млн т/год навоза мелкого рогатого.

При этом, в стране сейчас недостаточно мощностей для переработки навоза и помета, хотя из навоза можно производить компост и органические удобрения для внесения на сельскохозяйственные земли.

К отходам животного происхождения также относят отходы аквакультуры. В период с 1990 по 2025 год мировое производство продукции аквакультуры выросло более чем в шесть раз, со средним ежегодным увеличением на 5,8 процента в период с 2000 по 2025 год. Отходы жизнедеятельности водных обитателей, являются основными источниками твердых отходов в аквакультуре. Твердые отходы чрезвычайно вредны для рыб. При выращивании и вылове рыбной продукции в России образуется примерно 1,7 млн т/год этих отходов. В настоящее время аквакультуре уделяется большое внимание с целью минимизации загрязнения воды и повышения потенциала выживания морских животных.

Агропромышленные отходы — это еще одна категория сельскохозяйственных отходов, которые представляют собой побочные продукты, образующиеся в пищевой промышленности. К ним относятся багасса сахарной промышленности, шелуха, кожура и выжимки овощей и фруктов (манго, яблок, апельсин, капусты, помидоры, салатов и т.д.), остатки

крахмала, яичная скорлупа, кожа птицы и сельскохозяйственных животных и др [4].

В результате деятельности по упаковке, переработке, хранению и распределению в пищевой промышленности образуются огромные количества органических отходов не природного происхождения в Китае (32,0 млн тонн); - России (17,9 млн тонн); - США (15,0 млн тонн); - Индии (1,81 млн тонн). К не природным отходам относятся: упаковка из бумаги и полиэтилена; полиэтиленовая тара, загрязнённая химическими препаратами; мульчирующая пленка; торфяной и минеральный субстрат; удобрения и химические препараты утратившие потребительские свойства.

На сегодняшний день в мире применяются примерно 5000 видов пестицидов и 700 химических ингредиентов, отходы которых наносят непоправимый вред окружающей среде и здоровью человека ввиду их высокой токсичности. По данным исследований «Глобального рынка по производству пестицидов», объем производства пестицидов на мировом рынке к 2019 году планируется довести до 3,2 млн. тонн, по сравнению с 2,3 миллиона тонн в 2013 году. Таким образом совокупный среднегодовой темп роста в период с 2014 по 2020 будет составлять 6,1% [5].

С целью рациональной переработки сельскохозяйственных отходов необходимо провести их классификацию, составить карту возможных способов переработки и выбрать универсальный метод для обработки смешанных отходов

На основе глубокого анализа литературных данных разработана классификация основных видов сельскохозяйственных отходов, приведенная на рис. 1.

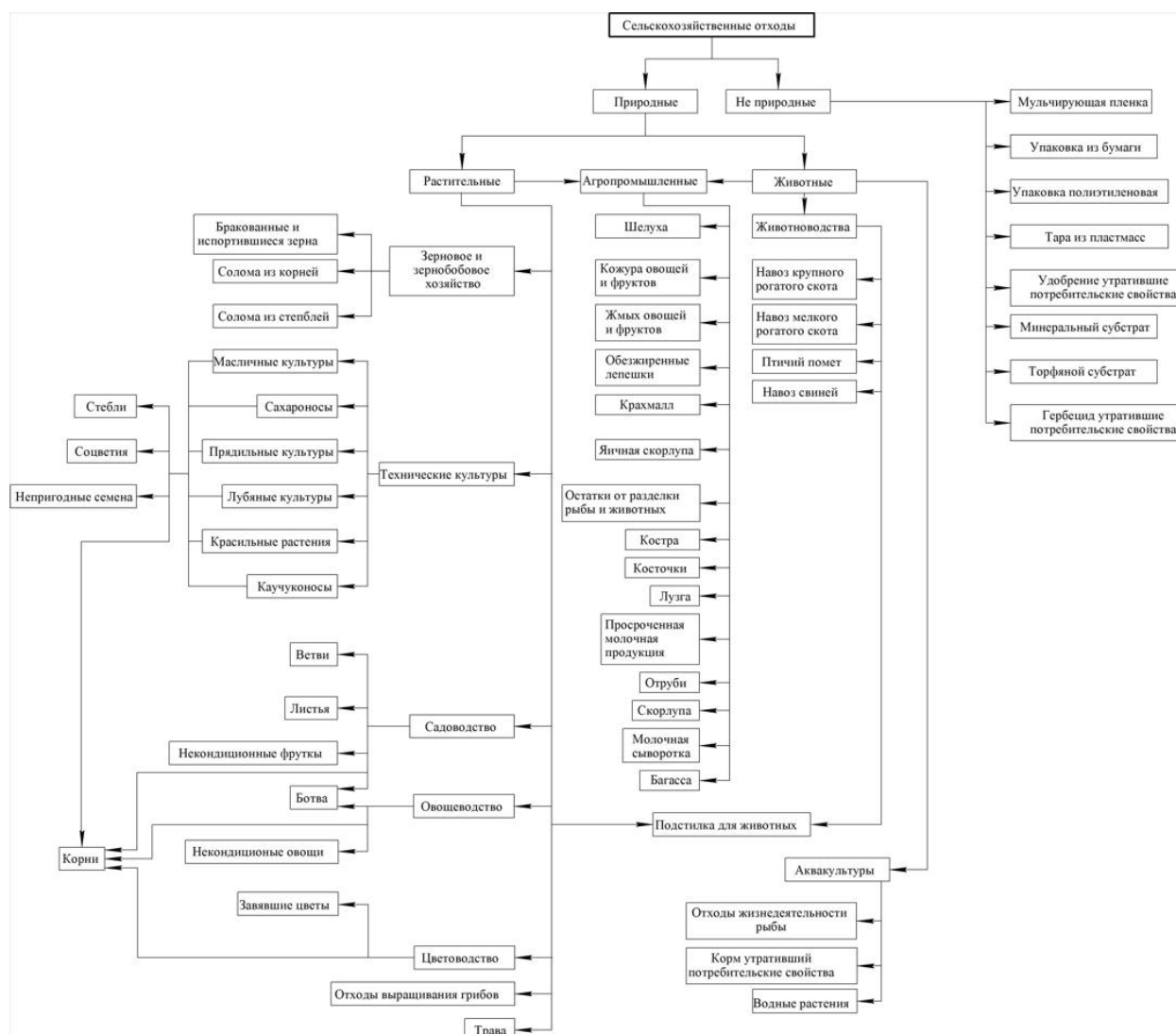


Рис. 1 Классификация основных видов сельскохозяйственных отходов

Обилие видов сельскохозяйственных отходов требует применения различных способов переработки с получением новых продуктов сельскохозяйственного или прочего назначения.

Возможные способы переработки сельскохозяйственных отходов в вторичные отходы представлены на рис. 2.

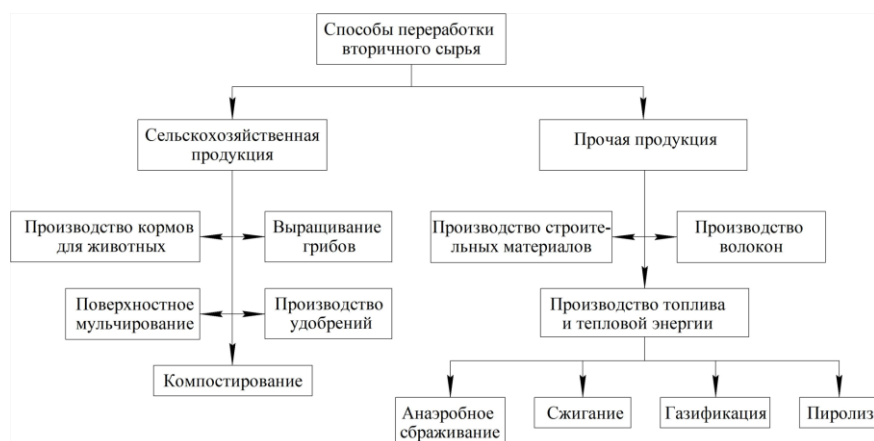


Рис. 2 Классификация способов переработки сельскохозяйственного отходов в вторичные продукты.

К вторичным продуктам сельскохозяйственного назначения относятся: корма; растительные средства для мульчирования почвы; удобрения; произведённые из отходов животноводства [6]. Для производства продуктов прочего назначения (строительные материалы, волокна и тепловая энергия) применяют в основном отходы агропромышленного комплекса. Из остальных не востребованных отходов получают газообразное, жидкое, твердое топлива термохимической переработкой или анаэробным сбраживанием [7].

При невозможности получения вышеуказанных продуктов, когда отходы не являются вторичным сырьем, применяют химическую переработку или захоронение:

- контейнерный способ. Опасные химикаты помещаются в контейнеры, где они сохраняются до 20 лет. Это один из наиболее дорогостоящих методов, так как потребуются оборудовать место для захоронения – подземные бункеры [8];

- биологический способ. При такой методике к химически опасным материалам подмешивают активные бактерии и микроорганизмы, полностью обезвреживающие состав. Это один из наиболее современных, безопасных и быстро развивающихся методов. При его помощи можно переработать практически любые пестициды [9];

– химический способ. Для обеззараживания используются разные химикаты, включая хлор. Методика не безопасна, так как после химической реакции могут оставаться опасные соединения;

– термический способ. При помощи такой методики полностью уничтожаются пестициды за счет высокой температуры процесса. Обезвреженные остатки отправляются на переработку или захоронение [10].

Достоинства и недостатки рассмотренных способов переработки вторичного сырья определяют целесообразность их применения для конкретного вида отходов (см табл. 1).

Таблица 1 – Карта возможного использования сельскохозяйственных отходов.

Отходы \ Продукты и способы переработки	Корма для животных	Удобрения	Компостирование	Производство волокон	Мульчирование	Био кирпичи	Выращивание грибов	Биотопливо	Термохимические методы		
									Пиролиз	Газификация	Сжигание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Растительные	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Агропромышленные	+	+	+					+	+	+	+
Животные		+	+					+	+	+	+
Не природные									+	+	+

Анализ табл 1 показывает, что каждый способ переработки имеет свою область применения относительно сельскохозяйственных отходов. На данный момент не существует единой технологии переработки всех сельскохозяйственных отходов с непродолжительным временем обработки и

минимальным воздействием на окружающую среду. Однако наиболее широким спектром перерабатываемых сельскохозяйственных отходов обладают термохимические процессы: пиролиз, газификация, сжигание. Пиролиз является более привлекательным методом переработки сельскохозяйственных отходов, с точки зрения востребованности получаемых продуктов: активированного угля, биоугля и биотоплива [11].

Методы и материалы

В ходе экспериментального исследования процесса пиролиза в качестве исходного сырья использовалась навеска массой 180 г.

Пиролиз проводился в лабораторной установке, включающей камеру пиролиза, помещённую внутрь муфельной печи [12]. Камера пиролиза выполнена из жаропрочной стали и герметично закрывается фланцевой крышкой с термостойкой прокладкой, что обеспечивает необходимую герметичность в условиях высоких температур. Из камеры пиролиза отводятся образующиеся при термическом разложении органические пары и газы через патрубок, соединённый с системой последующей обработки продуктов пиролиза. Эта система включает обогреваемую трубку (для предотвращения преждевременной конденсации высококипящих компонентов), смолоуловитель (где происходит конденсация тяжёлых смолистых фракций), конденсатор (в котором охлаждаются и конденсируются более лёгкие пары, образуя так называемую «жизку»), а также гидрозатвор и сборник для улавливания несконденсированных газов. Температура процесса пиролиза 500 °C при скорости нагрева 3 °C/с. Текущая масса сырья в камере пиролиза вычисляется на основе материального баланса.

Активация угля осуществлялась в специализированной лабораторной установке [13], в состав которой входили парогенератор, камера активации, размещённая внутри муфельной печи, а также система сепарации продуктов активации. Температура процесса активации: 900 °C при расходе водяного пара 2,5 кг/ч на 1 кг активированного угля. Система сепара-

ции включала конденсатор, предназначенный для разделения парогазовой смеси на конденсированную водную фазу и несконденсированные газы активации, что позволяло эффективно удалять влагу и контролировать состав отходящих газов.

Для определения оптимальных условий процесса и оценки влияния времени активации на степень выгорания углерода и, соответственно, на массу получаемого активированного угля была проведена серия экспериментов. В ходе этих опытов фиксированные навески угля подвергались воздействию перегретого водяного пара при заданной температуре (поддерживаемой муфельной печью) в течение различных промежутков времени — от коротких до максимально допустимых, при которых ещё сохраняется структурная целостность угольного каркаса. После каждого эксперимента образцы охлаждались в инертной атмосфере, взвешивались и фиксировалась их конечная масса. На основе полученных данных строилась зависимость массы угля от продолжительности паровой активации, что позволило не только определить кинетику процесса выгорания, но и выбрать рациональное время активации для достижения требуемой пористости и удельной поверхности конечного продукта.

Исследуемым сырьём являлись измельчённые в рубительной машине костра льна, скорлупа грецкого ореха и лузга подсолнечника. Размер частиц составлял $2 \times 2 \times 2$ мм. Начальная масса пробы — 180 г, начальная влажность — 5 %

Результаты

На рис. 3 приведены кинетические зависимости удельной массы смеси отходов состоящие из 80% отходов АПК (костра льна, лузга подсолнечника) и из 20 % отходов не природного происхождения (бумага упаковочная).

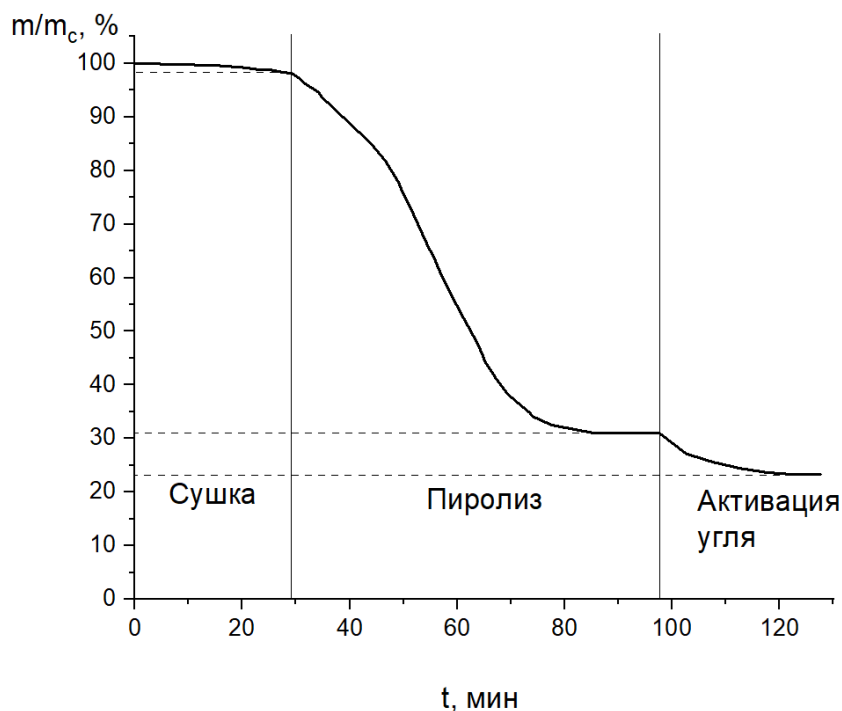


Рис. 3 - Кинетические зависимости удельной массы смеси отходов.

График, демонстрирует типичную для биомассы и целлюлозосодержащих материалов кинетику термического разложения с чётко выраженными этапами: сушка → пиролиз → активация угля. Каждый из этих этапов имеет свои особенности, обусловленные химическим составом исходного сырья. На первом этапе, сушки (0–30 мин), происходит удаление физически связанной влаги, масса снижается незначительно — примерно на 2–3%, что указывает на относительно низкую влажность исходной смеси. Это характерно для предварительно подготовленных или высушенных отходов АПК. Даже небольшое снижение массы в начале может влиять на точность последующих расчётов, поэтому корректное определение точки начала пиролиза (приблизительно 30 мин) критично для интерпретации данных. На этапе пиролиза (30–95 мин) происходит деструкция органических компонентов: целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина (в отходах АПК) и целлюлозных наполнителей (в бумаге). Интенсивность разложения проявляется резким падением массы с ~98% до ~30% за ~69 минут, что свидетельствует о высокой реакционной способности смеси при нагревании.

Наличие бумаги (20%) усиливает процесс, поскольку она содержит легко разлагающиеся целлюлозные волокна. На этапе активации угля (98–120+ мин) происходит дальнейшее снижение массы (с ~30% до ~23%), что указывает на активацию углеродного остатка. Активация — это процесс окисления или газификации поверхности угля, направленный на создание пористой структуры. Снижение массы на 7% за 25–30 минут свидетельствует о протекании реакций с участием активирующего агента водяным паром, который выжигает примеси и часть углерода, образуя поры и увеличивая удельную поверхность. Снижение массы на этом этапе — нормальное явление, поскольку примеси и часть углерода превращаются в газообразные продукты (CO , CO_2 , H_2). Конечная масса, около 23% от исходной, — это выход активированного угля,

На выходе получается биоуголь применяемый в качестве удобрения для обогащения почвы или для получения активированного угля.

В настоящее время на кафедре «Переработки древесных материалов» КНИТУ разработана непрерывно действующая установка для производства активированного угля из сельскохозяйственных отходов [14], которая представленная на рис.4.

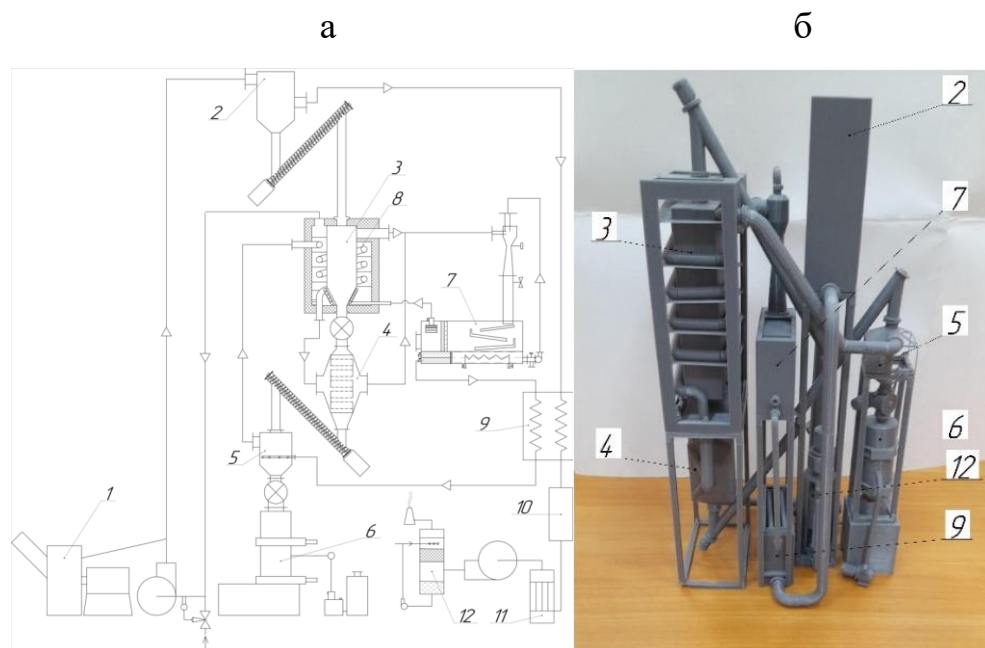


Рис. 4 – Схема (а) и внешний вид (б) установки для пирогенетической переработки сельскохозяйственных отходов в активированный уголь: 1 – измельчитель; 2 – узел конвективной сушки; 3 – пиролизная камера; 4 – камера активации; 5, 6 – первая и вторая стадии охлаждения активированного угля; 7 – эжекционный сепаратор; 8 – рубашка пиролизной камеры; 9 – теплообменник; 10, 11, 12 – электрический, рукавный, абсорбционный фильтры.

Установка работает следующим образом. Вторичное сырье измельчается в дисковом измельчителе 1, сушится топочными газами в узле конвективной сушки 2. В камере пиролиза 3 высушенное сырье перерабатывается в уголь с выделением пиролизных газов. Активация угля проходит в камере активации 4 перегретым водяным паром с выделением горючих газов активации. Активированный уголь охлаждается в две стадии: орошением водой 5 с выделением водяного пара и понижением давления 6. Пиролизные газы из пиролизной камеры 4 и горючие газы активации из камеры активации 5 сепарируются в эжекционном сепараторе 7 на жижку, воду и горючие газы, последние сжигаются в рубашке 8 пиролизной каме-

ры 3. Сепарированная вода, предварительно нагретая топочными газами в теплообменнике 9, охлаждает активированный уголь на первой стадии охлаждения. Топочными газами перегревают пар с первой стадии охлаждения угля, нагревают пиролизную камеру 3 и конвективно сушат измельченное сырье. Отработанные топочные газы последовательно очищаются в электрическом 10, рукавном 11, абсорбционном 12 фильтрах.

Заключение.

На основании аналитических исследований разработана классификация основных видов сельскохозяйственных отходов. В соответствии с полной классификацией образования сельскохозяйственных отходов рекомендованы варианты и способы их переработки. Показана целесообразность переработки смешанных видов сельскохозяйственных отходов термохимическими методами.

Лабораторные исследования подтвердили высокую перспективность термохимической переработки смешанных отходов АПК. Основным результатом таких процессов являются: получение биоугля — твердого углеродистого остатка, который может использоваться в качестве почвообразующий материала; адсорбента или топлива. Установлено, что выход биоугля из смешанных отходов (например, 80% биомассы АПК и 20% бумаги) составляет около 30% от исходной массы, а активированного угля - 23%.

Разработана непрерывно действующая установка для термохимической переработки смешанных сельскохозяйственных отходов.

Список литературы

1. Кузнецова Н. А., Зинич Л. В. Вторичная переработка отходов как фактор устойчивого развития сельскохозяйственных предприятий //Фундаментальные исследования. – 2021. – №. 11. – С. 120-124.
2. Фисунова Людмила Владимировна, Вишневская Анастасия Вячеславовна АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УТИЛИЗАЦИИ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ // Известия ОГАУ. 2022. №5 (97).

3. Мерзлая, Г. Е. Проблемы использования органических отходов в агрикультуре / Г. Е. Мерзлая // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 40-50. – EDN TJIKZD.
4. Семеренко С. А. Экология и защита растений // Масличные культуры. 2015. №4 (164).
5. Тареев А. И. и др. Мировой рынок химических средств защиты растений: потенциальные потери урожая, тренды и перспективы производства пестицидов для экономики России //Техника и технология пищевых производств. – 2024. – Т. 54. – №. 1. – С. 310-329.
6. Дрофичева Н. В., Причко Т. Г. Функциональные продукты питания с использованием компонентов вторичного сырья сокового производства // Вестник ВГУИТ. 2018. №3 (77).
7. Валиев А. Р. и др. Приоритеты развития агропромышленного комплекса и задачи аграрной науки и образования //Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – №. 1. – С. 97-107.
8. Ханина А. В. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ НА ТЕРРИТОРИИ КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ //Наука в исследованиях молодежи-2021. – 2021. – С. 84-86.
9. Рассолов С. Н., Багно О. А., Беспоместных К. В. Биологический способ утилизации свиного навоза //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №. 11. – С. 220-225.
10. Тюрин В. Г. и др. Современные способы обеззараживания органических отходов животноводства //Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. – 2021. – №. 2. – С. 175-182.
11. Агапкин А. М., Махотина И. А. Переработка сельскохозяйственных отходов: рынок органических удобрений и производство органических пищевых продуктов //Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – №. 3. – С. 212-225.
12. Экспериментальная установка для исследования пирогенетической переработки органических отходов / Р. Г. Сафин, А. С. Родионов, Д. Ф. Зиятдинова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 1(53). – С. 180-186. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-180-186. – EDN TIUKIA.
13. Моделирование процесса паровой активации углеродсодержащего сырья в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин, А. С. Родионов, В. Г. Сотников, Н. Ф. Тимербаев // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26, № 12. – С. 114-119. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_12_114. – EDN LNIVVW.
14. Патент № 2789699 С1 Российская Федерация, МПК C01B 32/324, C10B 53/00. Способ получения активированного угля : № 2021135547 : заявл. 03.12.2021 : опубл. 07.02.2023 / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, А. С. Родионов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет". – EDN ACLSDB.

References

1. Kuznecova N. A., Zinich L. V. Vtorichnaja pererabotka othodov kak faktor ustojchivogo razvitija sel'skhozajstvennyh predprijatij //Fundamental'nye issle-dovanija. – 2021. – №. 11. – S. 120-124.

2. Fisunova Ljudmila Vladimirovna, Vishnevskaja Anastasija Vjacheslavovna ANALIZ VOZMOZHNOSTEJ UTILIZACII I PERERABOTKI SEL'SKOHOZJAJ-STVENNYH OTHODOV // Izvestija OGAU. 2022. №5 (97).

3. Merzlaja, G. E. Problemy ispol'zovaniya organicheskikh othodov v agrikul'ture / G. E. Merzlaja // Jekologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza. – 2015. – T. 11, № 1. – S. 40-50. – EDN TJKZD.

4. Semerenko S. A. Jekologija i zashhita rastenij // Maslichnye kul'tury. 2015. №4 (164).

5. Tareev A. I. i dr. Mirovoj rynek himicheskikh sredstv zashhity rastenij: po-tencijal'nye poteri urozhaja, trendy i perspektivy proizvodstva pesticidov dlja jeko-nomiki Rossii //Tehnika i tehnologija pishhevyh proizvodstv. – 2024. – T. 54. – №. 1. – S. 310-329.

6. Droficheva N. V., Prichko T. G. Funkcional'nye produkty pitaniya s ispol'-zovaniem komponentov vtorichnogo syr'ja sokovogo proizvodstva // Vestnik VGUIT. 2018. №3 (77).

7. Valiev A. R. i dr. Prioritety razvitiya agropromyshlennogo kompleksa i za-dachi agrarnoj nauki i obrazovaniya //Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – T. 17. – №. 1. – S. 97-107.

8. Hanina A. V. JeKOLOGO-JeKONOMICHESKIE PROBLEMY OBRASHhENIJa S OTHODAMI NA TERRITORII KURGANSKOJ OBLASTI //Nauka v issledovanijah molodezhi-2021. – 2021. – S. 84-86.

9. Rassolov S. N., Bagno O. A., Bepomestnyh K. V. Biologicheskij sposob utili-zacii svinogo navoza //Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – №. 11. – S. 220-225.

10. Tjurin V. G. i dr. Sovremennye sposoby obezzarazhivaniya organicheskikh othodov zhivotnovodstva //Rossijskij zhurnal Problemy veterinarnoj sanitarii, gigeny i jekologii. – 2021. – №. 2. – S. 175-182.

11. Agapkin A. M., Mahotina I. A. Pererabotka sel'skohozejstvennyh ot-hodov: rynek organicheskikh udobrenij i proizvodstvo organicheskikh pishhevyh produk-tov //Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ja. – 2021. – №. 3. – S. 212-225.

12. Jeksperimental'naja ustanovka dlja issledovaniya pirogeneticheskoy pe-rerabotki organicheskikh othodov / R. G. Safin, A. S. Rodionov, D. F. Ziatdinova [i dr.] // Sis-temy. Metody. Tehnologii. – 2022. – № 1(53). – S. 180-186. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-180-186. – EDN TIUKIA.

13. Modelirovanie processa parovoj aktivacii uglerodsoderzhashhego syr'ja v tehnologicheskoy linii proizvodstva aktivirovannogo uglja / R. G. Safin, A. S. Ro-dionov, V. G. Sotnikov, N. F. Timerbaev // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2023. – T. 26, № 12. – S. 114-119. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_12_114. – EDN LNIVVW.

14. Patent № 2789699 C1 Rossijskaja Federacija, MPK C01B 32/324, C10B 53/00. Sposob poluchenija aktivirovannogo uglja : № 2021135547 : zajavl. 03.12.2021 : opubl. 07.02.2023 / R. G. Safin, V. G. Sotnikov, A. S. Rodionov [i dr.] ; zajavitel' Fe-deral'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazo-vaniya "Kazan-skij nacional'nyj issledovatel'skij tehnologicheskij universitet". – EDN ACLSDB.