

УДК 636.087.25

Пиролиз как способ переработки пищевых отходов

О. Н. БОНДАРЧУК^{1*}, д-р техн. наук В. А. ЕРМОЛАЕВ¹,
канд. техн. наук Д. Е. ФЕДОРОВ¹, канд. техн. наук О. Б. СОСНИНА²,
канд. техн. наук Е. В. МАХАЧЕВА³

¹Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого

²ООО «Управляющая компания Фуд-Мастер»

³Новосибирский государственный технический университет

*E-mail: b120983@list.ru

Для борьбы с пищевыми отходами разрабатывают и совершенствуют различные способы их переработки. Среди всех способов переработки пищевых отходов можно выделить пиролиз. Суть данного метода заключается в высокотемпературном воздействии на продукт, в результате которого происходит разложение органических и некоторых неорганических соединений. Целью настоящей работы являлся обзор научных трудов в области пиролиза пищевых отходов. Для этого были проанализированы отечественные и иностранные источники по соответствующим ключевым словам. Достаточно большой сегмент научных работ в области пиролиза пищевых отходов посвящен пиролизу скорлупы. Это обусловлено тем фактом, что скорлупа и ветки ореха обладают невысоким содержанием минеральных компонентов, что является благоприятным фактором для переработки указанного сырья в углеродные адсорбенты. Активно проводятся научные работы, в которых сравнивают показатели адсорбентов, полученных из пищевых отходов методом пиролиза. Из пищевых отходов с помощью пиролиза и паровой активации можно получать сорбенты на основе углерода, которые будут эффективны в сфере экологии — для борьбы с загрязнением воздуха и воды, вызванным промышленными выбросами. В большей части работ используется температурный режим пиролиза 400...600 °С, однако встречались работы с более низким температурным режимом 250...400 °С. В заключении отмечено, что пиролиз является эффективным методом переработки пищевых отходов в полезное с экологической и энергетической точки зрения сырье. Совершенствование технологий пиролиза, подбор оптимальных технологических режимов и конструктивных параметров пиролизеров позволит повысить эффективность переработки пищевых отходов в целом и улучшить экологическую обстановку планеты.

Ключевые слова: пиролиз, пищевые отходы, переработка.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 07.08.2025, одобрена после рецензирования 09.09.2025, принята к печати 17.11.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-32-39

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Бондарчук О. Н., Ермолаев В. А., Федоров Д. Е., Соснина О. Б., Махачева Е. В. Пиролиз как способ переработки пищевых отходов. // Вестник Международной академии холода. 2026. № 1. С. 32–39. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-32-39

Pyrolysis as a way of processing food waste

O. N. BONDARCHUK^{1*}, D. Sc. V. A. ERMOLAEV¹,
Ph. D. D. E. FEDOROV¹, Ph. D. O. B. SOSNINA², Ph. D. E. V. MAKACHEVA³

*E-mail: b120983@list.ru

¹Kuzbass State Agricultural University

²Food-Master Management Company LLC

³Novosibirsk State Technical University

*E-mail: b120983@list.ru

Various methods of food waste processing are developed and improved to control their use. Among all methods of food waste processing, pyrolysis can be distinguished. The essence of this method lies in the high-temperature effect on the product, which results in the decomposition of organic and some inorganic compounds. The purpose of this work was to review scientific papers in the field of food waste pyrolysis. For the purpose, domestic and foreign sources were analyzed by the relevant keywords. A fairly large segment of scientific papers in the field of food waste pyrolysis concerns the pyrolysis of shells. This is due to the fact that the shell and nut branches have a low content of mineral components, which is a favorable factor for processing this raw material into carbon adsorbents. A great number of research is carried out to compare the indicators of

adsorbents obtained from food waste by pyrolysis. Carbon-based sorbents can be obtained from food waste using pyrolysis and steam activation, which will be effective in the field of ecology — to handle air and water pollution caused by industrial emissions. In most works, the temperature regime of pyrolysis is 400...600 °C, however, there were works with the use of a lower temperature regime — 250...400 °C. In conclusion, it is noted that pyrolysis is an effective method of processing food waste into raw materials that are useful from an ecological and energy point of view. Improving pyrolysis technologies, selecting optimal technological modes and design parameters of pyrolyzers will increase the efficiency of processing food waste in general and improve the ecological situation of the planet.

Keywords: pyrolysis, food waste, processing.

Article info:

Received 07/08/2025, approved after reviewing 09/09/2025, accepted 17/11/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-32-39

Article in Russian

For citation:

Bondarchuk O. N., Ermolaev V. A., Fedorov D. E., Sosnina O. B., Makacheva E. V. Pyrolysis as a way of processing food waste. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2026. No 1. p. 32-39. DOI: 10.17586/1606-4313-2026-25-1-32-39

Введение

В настоящее время проблема пищевых отходов является одной из наиболее важных не только с экономической, но и экологической точки зрения. Отходы представляют собой источник токсичных веществ. При их захоронении вне специальных полигонов происходит проникновение вредных веществ в почву, водоемы и воздух [1, 2]. Известно, что разлагающиеся пищевые отходы выделяют метан, который оказывает более сильный парниковый эффект на атмосферу чем углекислый газ.

Помимо вышесказанного, пищевые отходы являются благоприятной средой для развития опасных микроорганизмов. Особенно это касается отходов вне помещений в мусорных баках в теплое время года. Образующиеся патогенные микроорганизмы в пищевых отходах являются причиной возникновения многих заболеваний. Все это усугубляется тем фактом, что пищевые отходы привлекают животных, насекомых и птиц, которые могут переносить заболевания и являться причиной возникновения пандемии.

Для борьбы с пищевыми отходами разрабатывают и совершенствуют различные способы их переработки (рис. 1) [3]. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками и для каждой группы отходов существует свой более приемлемый способ. Большая часть представленных способов являются дорогостоящими, однако постоянно проводятся исследования, целью которых является снижение затрат на переработку пищевых отходов. [4, 5]

Среди всех способов переработки пищевых отходов можно выделить пиролиз. Суть данного метода заключается в высокотемпературном воздействии на продукт, в результате которого происходит разложение органических и некоторых неорганических соединений. При этом существует несколько видов пиролиза: без доступа кислорода, окислительный, каталитический, инициированный, термоконтактный и гидропиролизный.

В результате пиролиза газообразные вещества испаряются и образуется сухой остаток. Применительно к пищевым отходам пиролиз можно использовать, например для выделения животного жира и белка или производства биодизельного топлива, которое на больших предприятиях может выступать как энергетический ре-

сурс [6]. Пиролиз позволяет перевести биомассу в жидкость, снизить затраты на транспортировку, хранение и обеспечить дальнейшее использование в качестве топливного ресурса. Условная эффективность производства энергии из биомассы биотоплива второго поколения составляет примерно 50%. [7]

Цель исследования

Целью настоящей работы являлся обзор научных трудов в области пиролиза пищевых отходов. Для этого были проанализированы отечественные и иностранные источники по соответствующим ключевым словам.

Обсуждение результатов проведенного исследования

Достаточно большой сегмент научных работ в области пиролиза пищевых отходов посвящен пиролизу скорлупы. Это обусловлено тем фактом, что скорлупа



Рис. 1. Способы переработки пищевых отходов

Fig. 1. Methods of food waste processing

и ветки ореха обладают невысоким содержанием минеральных компонентов, что является благоприятным фактором для переработки указанного сырья в углеродные адсорбенты.

Например, в работе [8] проводили исследование по использованию отходов сельскохозяйственной и деревообрабатывающей промышленности для получения высокоэнергетического топлива и углеродных адсорбентов. Скорлупу косточек вишни предварительно сушили, обрабатывали фосфорной кислотой, затем снова сушили и проводили низкотемпературный пиролиз в муфельной печи в условиях ограниченного кислорода. Температура процесса при этом составляла от 300 до 400 °С. Было установлено, что содержание углерода в готовом продукте зависит от реагента, которым было обработано исходное сырье, температуры и продолжительности пиролиза.

Авторы работы [9] исследовали процесс переработки скорлупы грецкого ореха методом пиролиза. Скорлупу высушивали до постоянного веса и подвергали медленному пиролизу при температуре от 250 до 550 °С в течение 50–65 мин. Скорость нагрева поддерживали на уровне 9–10 °С/мин. Установлено, что активное формирование структуры наблюдается в интервале температур 300–400 °С. Выход древесного угля при температуре пиролиза 550 °С составляет 31,4% [9].

В другой работе [10] использовали скорлупу орехов макадамии. Исходную скорлупу промывали водой и сушили: вначале на воздухе в течение 7 дней, затем в печи при температуре 110 °С. Полученную массу дробили до крупности частиц 2–5 мм и подвергали пиролизу при температуре 800 °С. В результате данного процесса получали биоуголь. Авторами было установлено, что биоуголь, полученный из скорлупы орехов макадамии по общей пористости примерно в 3 раза превышает таковой показатель у биоугля из скорлупы орехов кокоса и арахиса [10].

Авторы работы [7] для получения активных углей использовали в качестве сырья косточки сливы. Пиролиз осуществляли при температуре 600 °С, длительность обработки составляла 10 мин. Установлено, что карбонизаты, полученные пиролизом фрагментов косточек сливы, имеют прочность при истирании, близкую 98% [7].

В качестве сырья для пиролиза используют и скорлупу фундука. Ученые проводили исследования [11] по получению угля из скорлупы фундука методом пиролиза при температуре 500–550 °С. При этом получали угли, которые могут выступать в качестве топлива, либо как биоудобрение в сельском хозяйстве.

Активно проводятся научные работы, в которых сравнивают показатели адсорбентов, полученных из пищевых отходов методом пиролиза. Например, в работе [12] исследовали структурно-адсорбционные свойства адсорбентов, полученных из пищевых отходов (табл. 1). Из приведенной таблицы следует, что наибольшей суммарной пористостью по воде обладает сорбент, полученный из рисовой шелухи. Он же показывает на порядок большее поглощение красителем метиленовым синим чем остальные образцы.

Перерабатывать в биоуголь можно не только скорлупу орехов, но и оболочки семян манго [13]. В работах [14, 15] освещены условия пиролиза оболочек семян плодов одного из сортов манго (Yin Kwel), и активации полученного карбонизата водяным паром. Указанное сырье может служить хорошим исходным сырьем для получения активных углей высокого качества.

Из пищевых отходов с помощью пиролиза и паровой активации можно получать сорбенты на основе углерода, которые будут эффективны в сфере экологии — для борьбы с загрязнением воздуха и воды, вызванным промышленными выбросами. В работе [16] рассматриваются способ получения и использования указанных сорбентов не только для улучшения экологической обстановки, но и в медицине, пищевой промышленности при производстве напитков, масла и т. д.

Учеными в исследовании [17] проводилось изучение возможности применения сорбентов, полученных из растительных отходов, методом пиролиза для ликвидации нефтяных разливов. Установлено, что полученные сорбенты из отходов сахарного тростника способны поглощать дизельное топливо в количестве, превышающим свою массу на 41–63%: удельная статическая сорбционная емкость сорбента по отношению к нему достигла 1,4–1,6 г/г сорбента. Авторы в своей работе рекомендуют получать сорбенты при температуре пиролиза 600 °С.

Затрагивая тему адсорбции дизельного топлива, стоит упомянуть работу [18], где также используется пиролиз для получения активных углей с целью удаления дизельного топлива с поверхности воды. В качестве исходного сырья авторы использовали кожуру плодов тамаринда. На рис. 2 представлен график связи удельной фиксации пленочного дизельного топлива (a) с дозой активного угля (АУ), полученного на базе кожуры оболочек тамаринда методом пиролиза. На графике Т1 и Т2 — толщина пленок соответственно 0,15 и 0,30 мм. Из представленного графика следует, что с увеличением дозы активного угля наблюдается увеличение степени

Таблица 1

Структурно-адсорбционные свойства адсорбентов, полученных из пищевых отходов методом пиролиза [12]

Table 1

Structural and adsorption properties of adsorbents obtained from food waste by pyrolysis [12]

Сырье	Суммарная пористость по воде, см ³ /г	Объем сорбирующих пор, см ³ /г			Поглощение	
		H ₂ O	CCl ₄	C ₆ H ₆	Краситель метиленовый голубой	иод
Скорлупа кокосовых орехов	0,16	0,15	0,03	0,16	5,3	40,5
Рисовая шелуха	1,37	0,11	0,09	0,11	305,9	70,3
Оболочки семян манго	0,87	0,13	0,05	0,17	3,6	29,4
Оболочки косточки слив	0,68	0,09	0,06	0,18	3,5	77,2

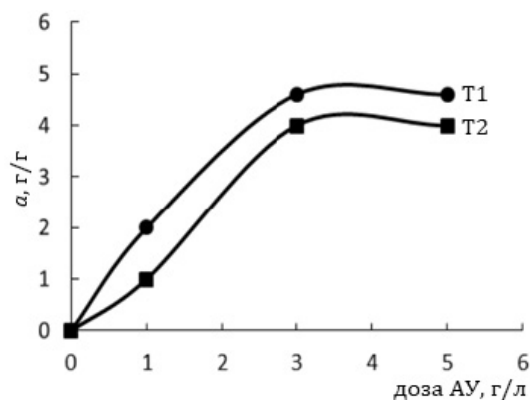


Рис. 2. График связи удельной фиксации пленочного дизельного топлива с дозой активированного угля, полученного из оболочек плодов тамаринда [18]

Fig. 2. The relationship between the specific fixation of film diesel fuel and the dose of activated carbon obtained from tamarind fruit shells [18]

связывания дизельного топлива, но только до определенного уровня.

Пищевые отходы на переработку попадают как правило неотсортированные — вместе с остатками пищи присутствует упаковка из картона и пластика. Учеными в одной из работ [19] был исследован процесс пиролиза пищевых отходов с остатками упаковки. Сырьем служили пищевые отходы из смеси муки, сухого молока, яичного порошка, картофельного порошка, глютена, кукурузного крахмала, сахара, а также бумаги и смесей раз-

личных типов пластика. В результате было установлено, что твердые пищевые отходы со смесью упаковки являются хорошим сырьем для получения топливного газа путем пиролиза. Выход газа составил около 50%. Помимо этого, было обнаружено относительно слабое влияние состава смешанных пищевых отходов на состав конечного продукта. При этом были обнаружены температурные режимы, влияющие на состав продукта. Получаемые с помощью пиролиза угли обладают высокой реакционной способностью к окислению и могут успешно сжигаться для получения тепла.

Проводятся исследования по анализу влияния пиролиза на изменение состава углекислого газа в атмосфере. Например, ученые проводили исследования [20] по влиянию пиролиза на отрицательный выброс углекислого газа. Для этого авторы использовали установку, схема которой представлена на рис. 3.

Эксперименты по пиролизу проводили с различными видами пищевых отходов. Авторами было установлено, что наибольший выход угля (212 г/кг) при температуре пиролиза 650 °C наблюдался у смеси риса и картофеля фри. При этом на каждый кг пищевых отходов будет удалено из воздуха 536 г углекислого газа. Было также обнаружено, что повышение температуры пиролиза свыше указанного значения влечет за собой снижение количества улавливаемого CO₂ [20].

Схожий температурный режим наблюдался в другой научной работе [21], где проводили исследования процессов медленного пиролиза пищевых отходов, таких как шелуха канолы и овсяная шелуха. В работе было установлено, что биоуголь, полученный при температуре пи-

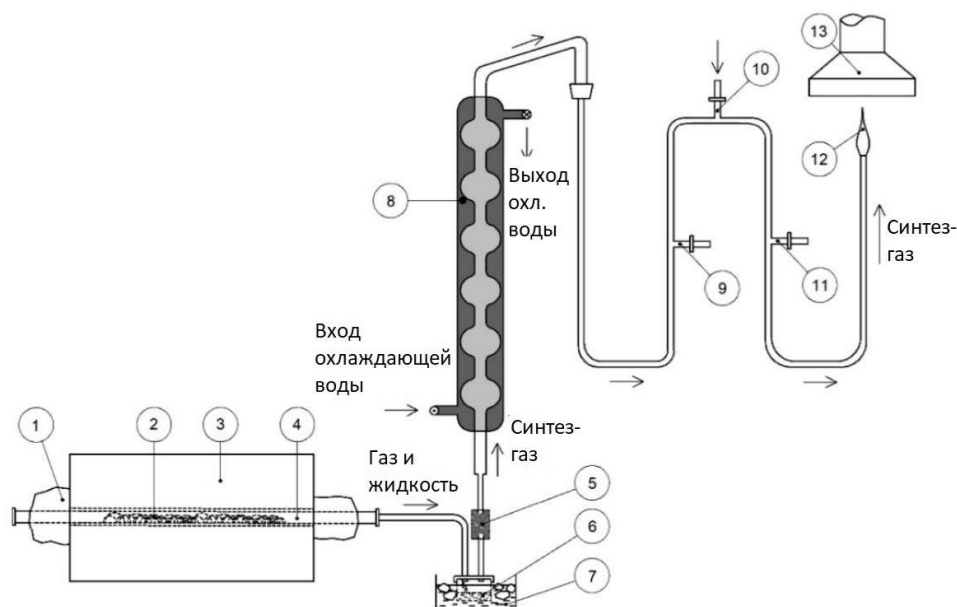


Рис. 3. Установка для проведения экспериментов по пиролизу:

1 — теплоизоляция; 2 — материал образца; 3 — трубчатая печь; 4 — жаропрочная стальная трубка (реактор); изоляция; 5 — фильтр; 6 — сборник жидкого продукта; 7 — ледяная баня; 8 — обратный холодильник Аллина; 9 — отверстие для отбора проб газа; 10 — входное отверстие для CO₂; 11 — порт отбора проб газа (после впрыска); 12 — факел; 13 — экстрактор [20]

Fig. 3. Pyrolysis experiment setup:

1 — thermal insulation; 2 — sample material; 3 — tube furnace; 4 — heat-resistant steel tube (reactor); insulation; 5 — filter; 6 — liquid product collector; 7 — ice bath; 8 — Allihn condenser; 9 — gas sampling port; 10 — CO₂ inlet; 11 — gas sampling port (after injection); 12 — torch; 13 — extractor [20]

ролиза 600 °C со скоростью 5 °C/мин в течение 60 мин показал лучшие характеристики, чем уголь, полученный при температуре 300 °C. Такой уголь показывал большие величины термической стабильности, теплотворной способности, содержания углерода, уровня pH, электропроводности и площади поверхности и объема пор [21].

Кинетика пиролиза для различных видов продуктов различается. В работе [22] проводилось исследование кинетики пиролиза таких видов пищевых отходов как злаковые, мясные, овощи и смешанные пищевые отходы. На рис. 4 представлены графики пиролиза указанных видов отходов.

Пиролиз начинается при температуре около 250 °C, основная часть пиролиза приходится на температурный диапазон от 300 до 360 °C. Основная реакция пиролиза завершается при температуре порядка 400 °C. При этом из графиков на рис. 4, а следует, что для разных видов продуктов масса в указанных температурных диапазонах меняется с различной скоростью. На рис. 4, б видны 4 пика кривых ДТГ, которые соответствуют разложению различных компонентов. Например, первый пик соответствует разложению углевода, который составляет 90% массы исходного сырья.

Одним из преимуществ пиролиза по сравнению с другими методами переработки, такими как компостирование, анаэробное сбраживание и сжигание является возможность его применения для пищевых отходов с высоким содержанием соли. Проводились исследования [23] по пиролизу пищевых отходов, содержащих 3% NaCl в диапазоне температур от 200 до 400 °C. Результаты исследования показали, что NaCl может улетучиваться при низкой температуре пиролиза 200...300 °C и может быть сконцентрирован и зафиксирован в конечном продукте (угле) при температуре пиролиза 300...400 °C. После очистки водой содержание NaCl в угле составляет менее 2%.

Для пиролиза пищевых отходов можно применять микроволновое излучение. В одной из научных работ [24] изучали процесс пиролиза с помощью микроволнового излучения. На рис. 5 приведена схема экспериментальной установки.

С использованием данной установки авторами было установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность микроволнового пиролиза, являются мощность микроволнового излучения и исходное влажностное содержание пищевых отходов. Для пиролиза пищевых отходов с помощью микроволн рекомендуется использовать установки с более высокой мощностью излучения и более низким влажностным содержанием. Установлено, что мощность микроволн 418 Вт и МС 11% обеспечивают более высокую температуру, скорость нагрева и тепловую эффективность [24].

Помимо рассмотренных выше температурных режимов существует и так называемый мягкий пиролиз, при котором процесс протекает при температуре не выше 160 °C и избыточном давлением менее 0,01 МПа. Для этого авторы работы [25] использовали установку, использующую перегретый водяной пар, а в качестве исходного сырья — стебли кукурузы. Было установлено, что после мягкого пиролиза с увеличением продолжительности процесса наблюдается содержание антиоксидантов в оболочке подсолнечника.

Ряд работ направлен на разработку эффективных конструкций пиролизеров и расчет параметров пиролиза с помощью математических моделей. Например, в работе [26] производился расчет скорости перемещения фронта пиролиза (поршня), длительности сушки и пиролиза, а также длины сушильной и пиролизной камеры. Схема самого пиролизера представлена на рис. 6. Обозначения на схеме: 1 — загрузочное средство; 2 — привод; 3 — поршень; 4 — труба; 5 — загрузочная камера; 6 — камера сушки; 7 — камера пиролиза; 8 — камера конденсации; 9 — охлаждающая камера; 10 — средство разгрузки; 11 — кожух; 12 — теплоизоляция; 13 — источник тепла; 14 — топочные газы; 15 — жидкая фракция; 16 — несконденсированные газы; 17 — водяные пары; 18 — удаляемая твердая фаза [26].

В данной установке сырье с помощью загрузочного средства 1 помещают в загрузочную камеру 5. Поршень 3 толкает сырье последовательно через камеру сушки 6, камеру пиролиза 7, охлаждающую камеру 9. Полученную твердую фракцию 18 удаляют из пиролизера разгрузоч-

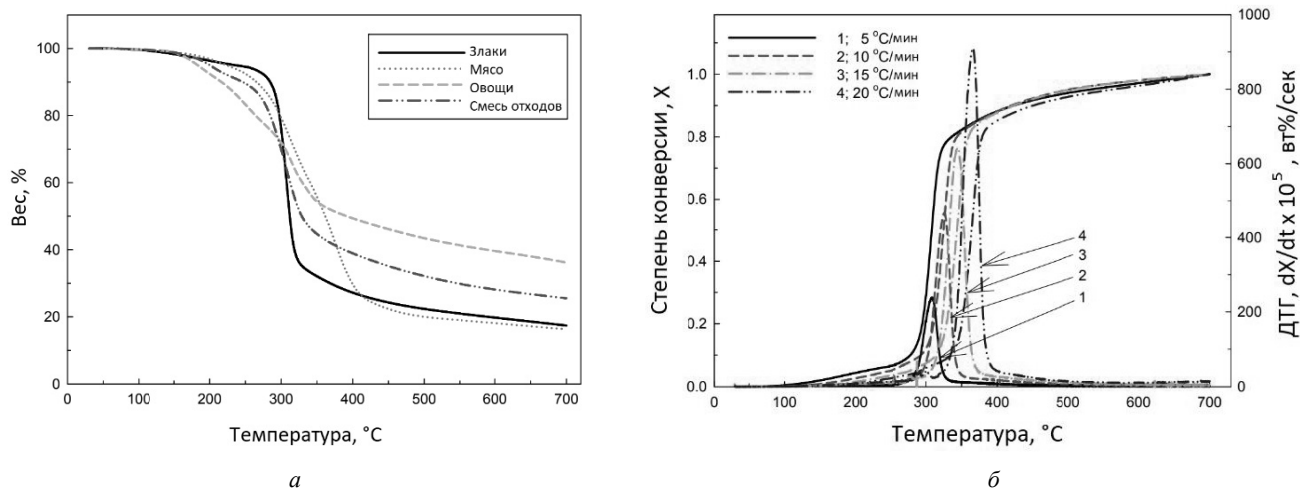


Рис. 4. Графики термогравиметрического анализа пищевых отходов (а) и график дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) злаковых отходов при пиролизе [22]

Fig. 4. Thermogravimetric analysis of food waste (a) and differential thermogravimetry (DTG) of cereal waste during pyrolysis [22]

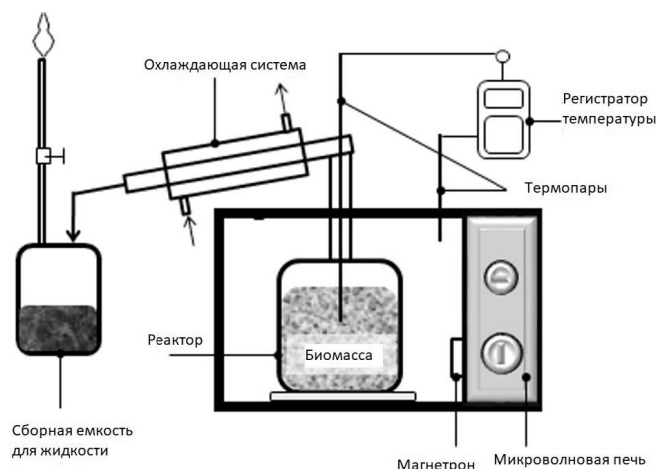


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для пиролиза микроволновым излучением [24]

Fig. 5. Experimental setup for microwave pyrolysis [24]

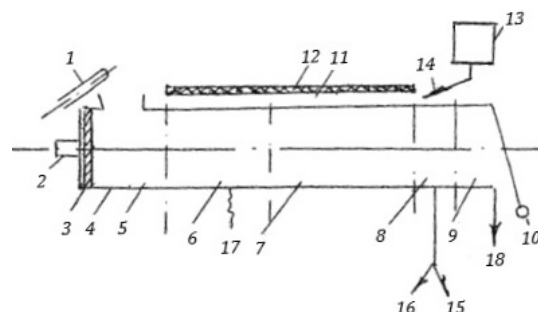


Рис. 6. Схема пиролизера

Fig. 6. Pyrolyzer

ным средством 10. Жидкая фракция, водяные пары и несконденсированные газы также удаляются из аппарата. Нагрев осуществляется за счет топочных газов 14, которые подаются в кожух аппарата 11. После вытеснения поршнем всей массы его отводят в первоначальное положение, загружают новую порцию сырья и процесс повторяют [26].

Заключение

Таким образом, был проведен обзор научных работ в области пиролиза пищевых отходов. Установлено, что в качестве исходного сырья в достаточно большом сегменте работ выступает скорлупа орехов, что обусловлено невысоким содержанием минеральных компонентов. Основными продуктами пиролиза пищевых отходов яв-

ляются топливо и адсорбенты, которые могут использоваться для поглощения разливов дизельного топлива с поверхности воды. В большей части работ используется температурный режим пиролиза 400...600 °С, однако встречались работы с более низким температурным режимом 250...400 °С. В заключении можно сказать, что пиролиз является эффективным методом переработки пищевых отходов в полезное с экологической и энергетической точки зрения сырье. Совершенствование технологий пиролиза, подбор оптимальных технологических режимов и конструктивных параметров пиролизеров позволит повысить эффективность переработки пищевых отходов в целом и улучшить экологическую обстановку планеты.

Литература

References

1. Акимова Р. А., Амирханова А. М. Современные проблемы обеспечения экологической безопасности в сфере общественного питания. // Обществознание и социальная психология. 2022. № 7 (37). С. 231–234.
2. Vilas-Boas A. A. Natural bioactive compounds from food waste: toxicity and safety concerns/A. A. Vilas-Boas, M. Pintado, A. L. S. Oliveira // Foods. 2021. vol. 10. no 7. P. 1564. DOI: 10.3390/foods10071564
3. Гурина Р. Р., Нуржанов А. С. О некоторых вопросах управления пищевыми отходами в России. // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. 2017. № 1. С. 97–99.
4. Van der Werf P., Gilliland J. A., Seabrook J. A. «Reduce food waste, save money»: testing a novel intervention to reduce household food waste. // Environment and Behavior. 2019. vol. 53. no 2. pp. 1–32. DOI: 10.1177/0013916519875180
5. Wang A., Xi Luo, Liu X., Sun Y. How to reduce college students' food waste behavior: from the perspective of college canteen catering modes. // Sustainability. 2024. vol. 16. no 9. pp. 3577. DOI: 10.3390/su16093577
6. Беляев Н. М., Кисель А. А. Новые способы и потенциальные возможности применения отходов производства пищевой продукции. // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. 2019. С. 162–166.
7. Akimova R. A., Amirkhanova A. M. Modern problems of ensuring environmental safety in the field of public catering. *Social studies and social psychology*. 2022. No. 7 (37). pp. 231–234. (in Russian)
8. Vilas-Boas A. A. Natural bioactive compounds from food waste: toxicity and safety concerns/A. A. Vilas-Boas, M. Pintado, A. L. S. Oliveira. *Foods*. 2021. vol. 10. no 7. P. 1564. DOI: 10.3390/foods10071564
9. Gurina R. R., Nurzhanov A. S. On some issues of food waste management in Russia. *International scientific and practical conference dedicated to the memory of Vasily Matveevich Gorbatov*. 2017. No. 1. pp. 97–99. (in Russian)
10. Van der Werf P., Gilliland J. A., Seabrook J. A. «Reduce food waste, save money»: testing a novel intervention to reduce household food waste. *Environment and Behavior*. 2019. vol. 53. no 2. pp. 1–32. DOI: 10.1177/0013916519875180
11. Wang A., Xi Luo, Liu X., Sun Y. How to reduce college students' food waste behavior: from the perspective of college canteen catering modes. *Sustainability*. 2024. vol. 16. no 9. pp. 3577. DOI: 10.3390/su16093577
12. Belyaev N. M., Kisel A. A. New methods and potential applications of food production waste. *Regional problems of geology, geography, technosphere and environmental safety*. 2019. pp. 162–166. (in Russian)

7. Потороко И. Ю. Отходы пищевых производств как возобновляемые источники энергии: перспективность и технологические решения/И. Ю. Потороко, Л. А. Цирульниченко, Н. В. Попова, С. Венката Мохан // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2021. Т. 9. № 2. С. 16–25.
8. Красникова Е. М., Моисеенко Н. В., Гончаров В. В. Об использовании отходов агропромышленного комплекса и деревообрабатывающей промышленности для получения высокоэнергетического топлива и углеродных адсорбентов. // Журнал физической химии. 2023. Т. 97. № 4. С. 575–579. DOI: 10.31857/S0044453723040180
9. Токторбаева Г. П., Ташполотов Ы. Процессы пиролиза скорлупы *juglans regia* l. в интервале температур 250–550 °C с получением древесного угля. // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 7. С. 135–140. DOI: 10.33619/2414–2948/44/17
10. Сое Х. Т. Рациональные условия пиролиза скорлупы орехов макадамии при её переработке на углеродные адсорбенты/Х. Т. Сое, Ч. С. Аунг, В. М. Со, Л. С. Найнг, Д. В. Клущин, В. Н. Клущин // Успехи в химии и химической технологии. 2024. Т. 38. № 3 (282). С. 99–101.
11. Валиуллина А. И. Переработка отходов скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза/А. И. Валиуллина, А. Р. Валеева, С. А. Забелкин, А. Н. Грачев, Г. М. Бикбулатова, Р. М. Хазиахмедова // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 111–115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115
12. Со В. М. Термический рециклинг растительных отходов Мьянмы с получением углеродных адсорбентов/В. М. Со, Л. С. Найнг, М. Зин, Т. Мин, М. Т. Мьят, А. В. Нистратов, В. Н. Клущин // Башкирский химический журнал. 2020. Т. 27. № 1. С. 61–67.
13. Зин М. Побочные продукты переработки в активные угли оболочек семян манго/М. Зин, Л. С. Найнг, В. М. Со, А. В. Нистратов, В. Н. Клущин // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 12 (208). С. 61–63.
14. Зин М. Анализ процессов термической и термоокислительной деструкции отходов консервирования плодов манго/М. Зин, Л. С. Найнг, В. М. Со, В. Н. Клущин // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Том XXX. № 9 (178). С. 64–66.
15. Найнг Л. С. Оценка древесных отходов Республики Союз Мьянма как сырья для производства активных углей парогазовой активацией/Л. С. Найнг, М. Зин, В. М. Со, А. В. Нистратов, В. Н. Клущин // Сб. статей НПК «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2017». 2017. С. 948–953.
16. Saw W. M. Myanmar agricultural wastes processing by using the method of pyrolysis to produce new nano sorbents for environmental pollution control/W. M. Saw, Y. N. Zaw, A. N. Nistratov, V. N. Klushin // International Research Journal. 2025. no 1 (151). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.62>
17. Нгуен Д. Т. Сорбирующие материалы на основе продуктов пиролиза растительных отходов для ликвидации нефтяных разливов/Д. Т. Нгуен, А. И. Везенцев, Л. Ф. Перистая, В. А. Перистый // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1 (5). С. 454–457.
18. Массольд А. В., Дедов А. В. Технология применения природных сорбентов для удаления дизельного топлива с поверхности воды. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 33–37.
19. Serio M. Pyrolysis of Mixed Solid Food, Paper, and Packaging Wastes/M. Serio, Kroo E., Florczak E., Wójtowicz M., Wignarajah K., Hogan, J., Fisher, J. *SAE Technical Papers*. 2008. DOI: 10.4271/2008-01-2050.
7. Potoroko I. Y., Tsiurulnichenko L. A., Popova N. V., and Venkata Mohan. Food production waste as renewable energy sources: prospects and technological solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnology*. 2021. Vol. 9. No. 2. pp. 16–25. (in Russian)
8. Krasnikova E. M., Moiseenko N. V., Goncharov V. V. On the use of waste from the agro-industrial complex and the woodworking industry to produce high-energy fuels and carbon adsorbents. *Journal of Physical Chemistry*. 2023. Vol. 97. No. 4. pp. 575–579. DOI: 10.31857/S0044453723040180. (in Russian)
9. Toktorbaeva G. P., Tashpolotov Y. Pyrolysis processes of *juglans regia* L. shells in the temperature range of 250–550 °C to produce charcoal. *Bulletin of Science and Practice*. 2019. Vol. 5. No. 7. pp. 135–140. DOI: 10.33619/2414–2948/44/17. (in Russian)
10. Soe H. T. Rational conditions of pyrolysis of macadamia nut shells during its processing into carbon adsorbents/H. T. Soe, C. S. Aung, V. M. So, L. S. Naing, D. V. Klushin, V. N. Klushin. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2024. Vol. 38. No. 3 (282). pp. 99–101. (in Russian)
11. Valiullina A. I. Processing of hazelnut shell waste by rapid ablative pyrolysis/A. I. Valiullina, A. R. Valeeva, S. A. Zabelkin, A. N. Grachev, G. M. Bikbulatova, R. M. Khaziakhmedova. *System. Methods. Technologies*. 2022. No. 3 (55). pp. 111–115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115. (in Russian)
12. So V. M. Thermal recycling of Myanmar plant waste to produce carbon adsorbents/V. M. So, L. S. Naing, M. Zin, T. Min, M. T. Myat, A. V. Nistratov, V. N. Klushin. *Bashkir Chemical Journal*. 2020. Vol. 27. No. 1. pp. 61–67. (in Russian)
13. Zin M. By-products of processing mango seed shells into active carbons/M. Zin, L. S. Naing, V. M. So, A. V. Nistratov, V. N. Klushin. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018. Vol. 32. No. 12 (208). pp. 61–63. (in Russian)
14. Zin M. Analysis of the processes of thermal and thermo-oxidative destruction of mango fruit preservation waste/M. Zin, L. S. Naing, V. M. So, V. N. Klushin. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2016. Vol. XXX. No. 9 (178). pp. 64–66. (in Russian)
15. Naing L. S. Assessment of wood waste from the Republic of the Union of Myanmar as a raw material for the production of activated carbon by combined-cycle activation/L. S. Naing, M. Zin, V. M. So, A. V. Nistratov, V. N. Klushin. *Collection of articles of the SPC «Environmental, industrial and Energy security — 2017»*. 2017. pp. 948–953. (in Russian)
16. Saw W. M. Myanmar agricultural wastes processing by using the method of pyrolysis to produce new nano sorbents for environmental pollution control/W. M. Saw, Y. N. Zaw, A. N. Nistratov, V. N. Klushin. *International Research Journal*. 2025. no 1 (151). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.62>
17. Nguyen D. T. Sorbing materials based on pyrolysis products of plant waste for oil spill response/D. T. Nguyen, A. I. Vezentsev, L. F. Peristaya, V. A. Peristy. *Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*. 2020. No. 1 (5). pp. 454–457. (in Russian)
18. Massold A. V., Dedov A. V. Technology of using natural sorbents to remove diesel fuel from the water surface. *All materials. An encyclopedic reference book*. 2020. No. 3. pp. 33–37. (in Russian)
19. Serio M. Pyrolysis of Mixed Solid Food, Paper, and Packaging Wastes/M. Serio, Kroo E., Florczak E., Wójtowicz M., Wignarajah K., Hogan, J., Fisher, J. *SAE Technical Papers*. 2008. DOI: 10.4271/2008-01-2050.

- rajah K., Hogan, J., Fisher, J. // SAE Technical Papers. 2008. DOI: 10.4271/2008-01-2050.
20. Zsolt D. Production of Biochar by Pyrolysis of Food Waste Blends for Negative Carbon Dioxide Emission/D. Zsolt, H. Kovacs, G. Nagy // *Energies*. 2025. № 18 (144). DOI: 10.3390/en18010144.
21. Patra B. Slow pyrolysis of agro-food waste to produce biochar and activated carbon for adsorption of pollutants from model wastewater. 2021. DOI: 0.13140/RG. 2.2.35232.10244.
22. Junho J. Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Food Wastes/J. Junho, K. Seung-Soo, S. Jae-Wook, L. Ye-Eun, Y. Yeong-Seok // *Energies*. 2017. no 10 (1191). DOI: 10.3390/en10081191.
23. Ye-Eun L. Recycling Possibility of the Salty Food Waste by Pyrolysis and Water Scrubbing/L. Ye-Eun, J. Junho, K. Sun-Min, Y., Yeong-Seok. // *Energies*. 2017. no 10. (210). DOI: 10.3390/en10020210.
24. Anis S. Thermal Characteristics of Microwave Reactor for Pyrolysis of Food Waste/S. Anis, Y. Kurniawan, W. Sumbodo, R. Alhakim, S. Lestari // *Journal of Physical Science*. 2018. no 29. pp. 1–13. DOI: 10.21315/jps2018.29. s2.1.
25. Винницкая В. Ф. Расширение исследований нетрадиционного вторичного растительного сырья для получения пребиотических пищевых ингредиентов/В. Ф. Винницкая, Д. В. Акишин, К. В. Брыксина, Р. Л. Исьемин, О. Ю. Милованов // *Наука и Образование*. 2024. Т. 7. № 2.
26. Голубкович А. В., Чижиков А. Г. Расчет процесса пиролиза и параметров трубчатого реактора для растительных материалов. // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 5 (20). С. 331–335.
20. Zsolt D. Production of Biochar by Pyrolysis of Food Waste Blends for Negative Carbon Dioxide Emission/D. Zsolt, H. Kovacs, G. Nagy. *Energies*. 2025. № 18 (144). DOI: 10.3390/en18010144.
21. Patra B. Slow pyrolysis of agro-food waste to produce biochar and activated carbon for adsorption of pollutants from model wastewater. 2021. DOI: 0.13140/RG. 2.2.35232.10244.
22. Junho J. Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Food Wastes/J. Junho, K. Seung-Soo, S. Jae-Wook, L. Ye-Eun, Y. Yeong-Seok. *Energies*. 2017. no 10 (1191). DOI: 10.3390/en10081191.
23. Ye-Eun L. Recycling Possibility of the Salty Food Waste by Pyrolysis and Water Scrubbing/L. Ye-Eun, J. Junho, K. Sun-Min, Y., Yeong-Seok. *Energies*. 2017. no 10. (210). DOI: 10.3390/en10020210.
24. Anis S. Thermal Characteristics of Microwave Reactor for Pyrolysis of Food Waste/S. Anis, Y. Kurniawan, W. Sumbodo, R. Alhakim, S. Lestari. *Journal of Physical Science*. 2018. no 29. pp. 1–13. DOI: 10.21315/jps2018.29. s2.1.
25. Vinnitskaya V. F., D. V. Akishin, K. V. Bryksina, R. L. Isyomin, O. Yu. Milovanov Expansion of research of non-traditional secondary plant raw materials for obtaining prebiotic food ingredients. *Science and Education*. 2024. Vol. 7. No. 2. (in Russian)
26. Golubkovich A. V., Chizhikov A. G. Calculation of the pyrolysis process and parameters of a tubular reactor for plant materials. *Innovations in agriculture*. 2016. No. 5 (20). pp. 331–335. (in Russian)

Сведения об авторах

Бондарчук Ольга Николаевна

Ассистент кафедры биотехнологий и производства продуктов питания, Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, 650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5, b120983@list.ru

Ермолаев Владимир Александрович

Д. т. н., доцент, профессор кафедры биотехнологий и производства продуктов питания, Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, 650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5, ermolaevvla@rambler.ru

Федоров Дмитрий Евгеньевич

К. т. н., доцент кафедры агроинженерии, Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, 650056, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5, star-light@inbox.ru

Соснина Ольга Борисовна

К. т. н., директор по организации производства и развитию технологий, ООО «Управляющая компания Фуд-Мастер», 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 7, sob@food-master.ru

Махачева Екатерина Владимировна

К. т. н., доцент кафедры технологии и организации пищевых производств, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, shev-04@yandex.ru

Information about authors

Bondarchuk Olga N.

Assistant at the Department of Biotechnology and Food Production, Kuzbass State Agricultural University, 650056, Kemerovo, Markovtseva St. 5, b120983@list.ru

Ermolaev Vladimir A.

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Biotechnology and Food Production, Kuzbass State Agricultural University, 650056, Kemerovo, Markovtseva St. 5, ermolaevvla@rambler.ru

Fedorov Dmitry E.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Agroengineering, Kuzbass State Agricultural University, 650056, Kemerovo, Markovtseva St. 5, star-light@inbox.ru

Sosnina Olga B.

Ph. D., Director for Production Organization and Technology Development at Food-Master Management Company LLC, 7 Akademika Koptyuga ave., Novosibirsk, 630090, sob@food-master.ru

Makacheva Ekaterina V.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Food Production, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx ave., 20, shev-04@yandex.ru

