

ОТХОДЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ: ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

И.Ю. Потороко¹, Л.А. Цирульниченко¹, Н.В. Попова¹, С. Венката Мохан²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² CSIR – Индийский институт химической технологии (CSIR-IIT), г. Хайдарабад, Индия

В статье проанализированы основные подходы получения альтернативных источников энергии, способных заменить углеводородное топливо. Обзор сфокусирован на деструкции пищевых отходов и возможных методах их переработки. Пищевые отходы определены как возобновляемый ресурс, обладающий огромным энергетическим, химическим и материальным потенциалом из-за присутствия в них органических функциональных веществ. Авторами представлена доказательная база применимости пищевых отходов, а также сточных вод предприятий пищевых производств для получения биотоплива. В статье рассмотрены методы пиролиза, анаэробной ферментации и технология сжижения газов Фишера–Тропша. Процессы биоконверсии пищевых отходов представлены как наиболее перспективные. Однако для извлечения максимального количества редуцирующих сахаров из пищевых отходов необходимо подвергнуть их предварительной обработке, которая может проводиться либо индивидуально с помощью физических, химических, физико-химических, биологических и ферментативных методов, либо в сочетании этих технологий. Среди новейших подходов к производству биоэлектроэнергии из биомассы с использованием бактерий в статье приведен обзор технологии микробных топливных элементов (биокаatalиз). Прирост энергии микроорганизмами происходит за счет окисления донор-электронов и восстановления акцептор-электронов. Изменение условий акцептора электронов создает возможности использования энергии. Это гибридная биоэлектрохимическая система преобразует химическую энергию, хранящуюся в биоразлагаемых отходах в электрическую энергию через окислительно-восстановительные реакции, с помощью микроорганизмов, выступающих в качестве биокаatalизаторов. Таким образом, авторами приведен обзор современных достижений в области эффективного использования пищевых отходов для создания продуктов с добавленной стоимостью, которые позволят обеспечить устойчивость продовольственных систем и станут инструментом для решения глобальной проблемы сохранения ископаемых ресурсов и минимизации экологических рисков для биосферы планеты.

Ключевые слова: анаэробная ферментация, биокаatalиз, биотопливо, биоконверсия пищевых отходов.

Возобновляемые источники энергии для решения экологических проблем

В глобальном масштабе большая часть выбросов парниковых газов (ПГ) происходит за счет использования энергии, которая получается из ископаемого сырья, поэтому в последние годы все больше внимание уделяется поиску альтернативных источников энергии, способных достойно заменить углеводородное топливо. В этой связи все устойчивый интерес формируется в отношении отходов пищевых производств и возможности их использования в качестве возобновляемых источников энергии. Пищевые отходы – это возобновляемый ресурс, обладающий огромным энергетическим, химическим и материальным потенциалом из-за присутствия в них органи-

ческих функциональных веществ. Научным сообществом формируется доказательная база применимости пищевых отходов, а также сточных вод предприятий пищевых производств для получения биотоплива.

Определение методов деструкции пищевых отходов должно базироваться на понимании химической структуры их компонентов, которая изменяется в зависимости от состава пищевых продуктов, их формирующих. Немаловажным является то, что состав пищевых отходов (ПО) по структуре, физическим свойствам компонентов различны. Кроме того, объемы ПО, их возобновляемость напрямую зависят от количества предприятий пищевой индустрии и их направленности (переработка растительного или животного сырья) и воз-

возможности отделения ПО от основной массы ТКО.

Таким образом, возможность обработки и переработки ПО в продукты с добавленной стоимостью зависит от его доступности, сбора, химической сложности и пригодности для различных технологий обработки. В этой связи установление химической структуры ПО позволит определить наиболее приемлемые методы их переработки по эффективности с точки зрения извлекаемого энергетического потенциала [2].

На основании вышеизложенного можно утверждать, что пищевые отходы являются весьма перспективными возобновляемыми источниками энергии, а разработка наиболее приемлемых методов их переработки определяет глобальность в экологическом аспекте и актуальность обозначенной темы.

Как правило, обычные методы обращения с ПО включают анаэробное сбраживание, компостирование и кормление животных. В некоторых исследованиях показано, что в дополнение к этим и продуктам из ПО возможно посредством различных биологических, термических и химических превращений производить различные биоматериалы, биотопливо, а также бионефть.

За последние 15 лет производство «зеленого» топлива увеличилось в десятки раз, а его текущий объем превысил 60 млн тонн в год. Международные организации, независимые консультанты и ассоциации производителей биотоплива прогнозируют существенный рост производства и потребления биотоплива в мире к 2030 году.

В настоящее время около 90 % мирового потребления биотоплива приходится на биоэтанол и биодизель. Прогнозные оценки развития рынка свидетельствуют об однозначном росте биотопливного сегмента при условии сохранения приоритета за традиционным топливом. Так, к 2030 году, в зависимости от региона, биотопливо может занять от 10 до 30 % совокупного энергетического потребления.

Среди факторов, обусловивших развитие рынка биотоплива, присутствуют экологические, политические и социальные, такие как:

- стремление снизить зависимость отдельных государств от нефтяного импорта, что гарантирует им экономические выгоды и одновременно большой политический нейтралитет;

- следование требованиям Киотского протокола, предусматривающим сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу;

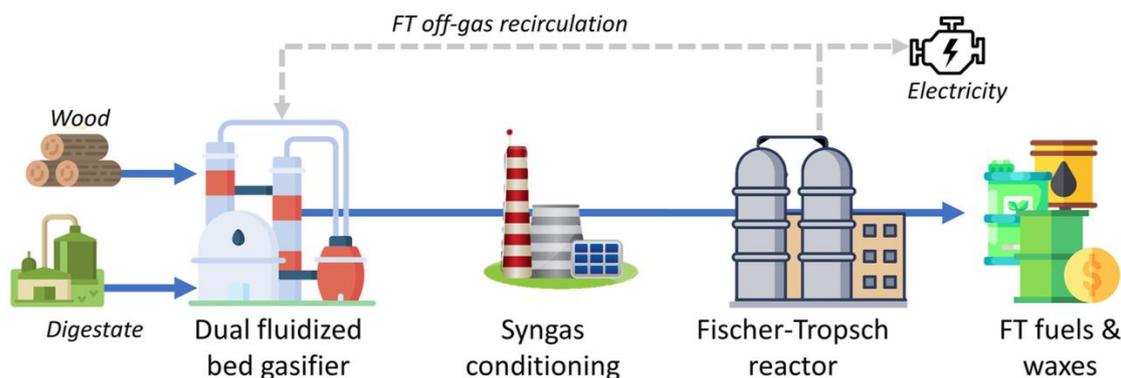
- необходимость развития аграрного сектора экономики, создания новых рабочих мест и т. д.

Различают два поколения биотоплива. К биотопливу первого поколения (1G) относят биоэтанол, получаемый из традиционного пищевого сырья (сахарной свеклы, тростника, кукурузы, зерновых), биодизель, получаемый из пищевых растительных масел (рапса, пальмового масла и пр.), а также чистые растительные масла. Условная эффективность производства энергии из биомассы биотоплива первого поколения составляет примерно 50 %.

Топливо, полученное на основе пиролиза, производится из непищевого сырья (отработанные жиры и растительные масла, биомасса деревьев и растений). Применение пиролиза позволяет перевести биомассу в жидкость, а применение данного подхода обеспечивает экономичность процессов транспортировки, хранения и дальнейшего использования для автомобильного топлива или топливного ресурса для электростанций. Условная эффективность производства энергии из биомассы биотоплива второго поколения составляет примерно 50 %.

Виды биотоплива, которые производятся в настоящее время, относятся к первому поколению и производятся из ферментированного растительного сырья (биоэтанол) и разнообразных растительных масел (биодизельное топливо). Для технологии топлива второго поколения применяются технологии (рис. 1) сжижения газов (gas-to-liquids, GTL) Фишера–Тропша (Fischer–Tropsch).

Учеными Норвегии исследован производственный потенциал и эффективность биотоплива Фишера–Тропша и водорода из газифицированных влажных органических твердых бытовых отходов. Потенциал улавливания углерода оценивался как для производственных процессов, так и для сравниваемого количества автотранспортных средств, которые могут быть снабжены выработанным таким способом топливом. Показано, что реализация проекта до 2030 года «Транспорт без выбросов углерода» может обеспечить 84 % необходимого сокращения выбросов парниковых газов [10, 11].



| | |
|-----------------------------|---|
| Wood | Древесина |
| FT off-gas recirculation | FT рециркуляция отходящих газов |
| Digestate | Дигестат |
| Dual fluidized bed gasifier | Газификатор с двойным псевдоожиженным слоем |
| Syngas conditioning | Кондиционирование синтез-газа |
| Fischer-Tropsch reactor | Реактор Фишера–Тропша |
| FT fuels & waxes | FT топливо и парафин |

Рис. 1. Установки по превращению биомассы древесины для получения топлива второго поколения [12]

Основным источником производства биоэтанола (около 1,5 млрд литров ежегодно) пока является пищевое сырье, а именно зерновые культуры. Перспективной с точки зрения выпуска транспортного топлива выглядит возможность использования в качестве сырья других крахмалосодержащих продуктов: мелассы (отходы сахарного производства), картофеля, сладкого сорго, топинамбура. Зеленая масса топинамбура характеризуется высоким содержанием углеводного комплекса (фруктоза, глюкоза, сахароза, фруктозиды и др.), что позволяет получать из каждой тонны 83,2 л спирта.

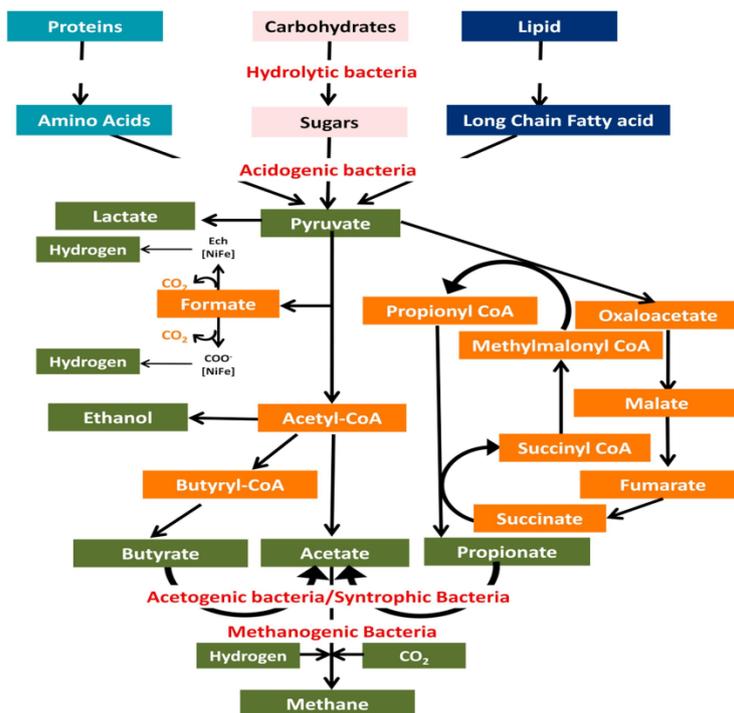
Биоконверсионные процессы и биопродукты

Переработка биомассы и органических отходов с помощью **анаэробного брожения** является наиболее перспективным направлением, позволяющим решить: энергетические, экологические и аграрные проблемы. Потенциал анаэробного брожения в РФ оценивается в миллиардах кубических метров биогаза и миллионах тонн органических удобрений в год.

Анаэробная ферментация (АФ) приобретает огромный интерес по сравнению с другими биоплатформами для биотоплива и химического производства биоматериалов с использованием биогенных отходов [15, 19]. АФ

представляет собой последовательный процесс, в котором гидролиз является первой стадией, за которой следует ацидогенез, ацетогенез, дегидрогенизация и метаногенез, что достигается поэтапным действием ассоциациями различных бактерий (рис. 2) [18].

Применение АФ для производства биогаза достаточно исследовано, в последние годы сформировалось расширение в сторону производства жидкого биотоплива [7], товарных химикатов [9, 10], биоводорода, биогитана. Доказано, что кислород способствует предварительному гидролизу отходов наряду с подавлением метаногенной активности, что приводит к усиленному образованию ацидогенных продуктов [17]. Сахара, такие как глюкоза, фруктоза, галактоза и рибоза, в основном добываются во время предварительной гидролитической обработки ПО [6]. С одной стороны, сахара имеют промышленное значение, и концентрация производимых сахаров в гидролизате зависит от принятой стратегии предварительной обработки, которая выбирается для ускорения выхода сахара, а также минимизации потерь с учетом повышения экономической эффективности процесса. Необходимо разработать комплексный метод предварительной обработки для извлечения максимального количества редуцирующих сахаров из FW.



| | | | |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Proteins | Белки | Oxaloacetate | Оксалоацетат |
| Amino Acids | Аминокислоты | Methylmalonyl CoA | МетилмалонилКоА |
| Carbohydrates | Углеводы | Ethanol | Этанол |
| Hydrolytic bacteria | Гидролитические бактерии | Acetyl-CoA | Ацетил-КоА |
| Sugars | Сахара | Butyryl-CoA | Бутирил-КоА |
| Acidogenic bacteria | Ацидогенные бактерии | Succinyl CoA | Сукцинил-КоА |
| Lipid | Липиды | Fumarate | Фумарат |
| Long Chain Fatty Acid | Длинноцепочечные жирные кислоты | Succinate | Сукцинат |
| Lactate | Лактат | Butyrate | Бутират |
| Hydrogen | Водород | Acetate | Ацетат |
| Pyruvate | Пируват | Propionate | Пропионат |
| Formate | Формат | Syntrophic bacteria | Синтрофные бактерии |
| Propionyl CoA | ПропионилКоА | Methanogenic Bacteria | Метаногенные бактерии |
| | | Methane | Метан |

Рис. 2. Схематический путь анаэробной ферментации для производства продуктов на биологической основе [18]

Предварительная обработка может проводиться либо индивидуально с помощью физических, химических, физико-химических, биологических и ферментативных методов, либо в сочетании этих стратегий [6]. Среди различных предварительных обработок предварительная обработка разбавленной кислотой считается многообещающим методом для богатой углеводами FW. Предварительная обработка с использованием соляной кислоты и серной кислоты в низких концентрациях обычно применяется напрямую или в сочета-

нии с ферментативным методом, чтобы избежать образования соединений, разлагаемых сахаром (фурфурол / гидроксиметилфурфурол). Кроме того, смесь ферментов α -амилазы, β -амилазы и глюкоамилазы также используется для преобразования крахмала в небольшие мономерные сахара.

Биоэтанол – это тоже весьма перспективное топливо, которое имеет дальнейшие перспективы к применению. Существует большое количество методов получения спирта из растительного сырья, недостатками которых явля-

ются: длительный срок осуществления процесса и невысокий выход спирта. Для более полного протекания гидролиза цепочек полисахаридов применяют кислотный гидролиз, который осуществляется в сильноокислой среде и при высоких температурах (рН 2,0; t 124 °С), по этой причине не является экологичным и кроме того, применение высоких температур приводит к ухудшению качества продукта и падению количественного выхода из-за побочных процессов разложения сырья [1].

Существует технология получения спирта при пониженных температурах и слабоокислом рН (рН 5,6–6,0; t 50–55 °С). Процесс идет под действием собственных ферментов сырья, для их активирования и большей полноты протекания процесса гидролиза добавляют ионы Ca^{2+} в сульфатной форме, в этих условиях разложение цепочек полисахаридов достигает 70–80 %. Недостатки вышеперечисленных методов заключаются в том, что процесс образования спирта при брожении занимает достаточно длительное время и является недостаточно селективным, в связи с чем выход целевого продукта значительно снижается по сравнению с теоретическим до 70–80 %.

Исключая вышеперечисленные недостатки, разработана методика каталитического разложения полисахаридов до моно- и олигосахаридов с использованием композитных катализаторов, представляющих собой каталитически активные функциональные группы, иммобилизованные в матрице силикагеля. В основе методики лежат исследования каталитических процессов разложения полисахаридов до низкомолекулярных веществ, ценных продуктов химической промышленности. Данный процесс позволяет получать ряд продуктов: фуран-2-альдегиды, левулиновую кислоту, алкил-гликозиды [2, 13].

Биологическое производство жирных кислот (ЖК) со средней длиной цепи происходит по пути обратного β -окисления, и этот путь был описан после изучения метаболического пути *Clostridium kluyveri* [8]. В этом пути синтеза ЖК вместо потребления ЛЖК в метан (CH_4) они могут быть удлинены на два атома углерода за цикл (C_6 – C_{10}). Процесс обратного β -окисления требует источника углерода, уменьшающего эквивалент и энергию от определенных доноров электронов. Помимо простого источника углерода, доноры электронов, такие как этанол, можно использовать лактат. Гидрофобная природа ЖК также об-

легчает их отделение от ферментационного бульона [4].

Весьма большие перспективы открываются для электроферментации (ЭФ). Регулирование кинетики скорости процессов ЭФ за счет воздействия электродов в микробной среде является механизмом электрокатализа (рис. 3), направленным на регулируемое образование продукта [14].

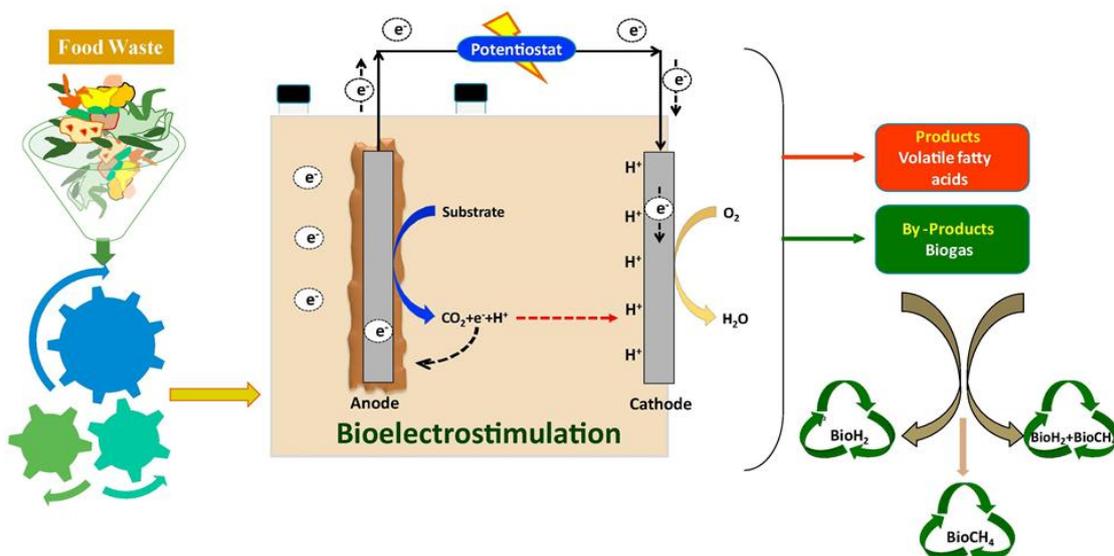
Использование этих акцепторов электронов на основе электродов может повысить скорость связывания электродов за счет устранения ограничений окислительно-восстановительного потенциала, преимуществ в улучшении целевых продуктов на биологической основе и стимулирования других несбалансированных реакций с получением чистых продуктов [3]. Этот метод все еще находится в зачаточном состоянии и рекламируется как многообещающий метод преобразования органических источников в ценные платформенные химические вещества и биотопливо.

Внешняя стимуляция этих электродов с приложенным потенциалом (положительным или отрицательным) создает синергию взаимодействий на границах раздела твердое тело – жидкость между электродом и микробами, влияя на скорость их электрометаболизма.

Существенный рост потребления биотоплива ожидается в первую очередь в таких странах, как Индия и Китай, где ведутся перспективные исследования по преобразованию отходов пищевых производств и их ингредиентов в пригодные для использования формы.

Технологии микробных топливных элементов представляют собой новейший подход к производству биоэлектроэнергии из биомассы с использованием бактерий. Прирост энергии микробами происходит за счет окисления донор-электронов и восстановления акцептор-электронов. Изменение условий акцептора электронов создает возможность использовать энергию. Это гибридная биоэлектрохимическая система преобразует химическую энергию, хранящуюся в биоразлагаемых отходах в электрическую энергию через окислительно-восстановительные реакции, с помощью микроорганизмов, выступающих в качестве биокатализаторов [5].

Микробный топливный элемент (МТЭ) представляет собой футуристические технологии, которые в ближайшем будущем станут повседневными, способными преобразовывать химическую энергию отходов напрямую



| | |
|-----------------------|------------------------|
| FoodWaste | Пищевые отходы |
| Potentiostate | Потенциостат |
| Substrate | Субстрат |
| Anode | Анод |
| Cathode | Катод |
| Bioelectrostimulation | Биоэлектростимуляция |
| Products | Продукты |
| By-Products | Побочные продукты |
| Volatile fatty acids | Летучие жирные кислоты |
| Biogas | Биогаз |

Рис. 3. Обобщенная схема технологии электроферментации

в биоэлектрическую энергию [10]. Микроорганизмы на аноде действуют как биокатализатор, производя восстановительные эквиваленты (электроны и протоны), которые помогают в электрохимическом окислении органического субстрата. МТЭ при интеграции с технологиями, основанными на аналогичных принципах, может стать гибридной технологией (рис. 4) для производства биоэлектроэнергии наряду с обработкой отходов [14, 16, 18].

Таким образом, резюмируя даже небольшую часть вышеизложенных исследований, мы вправе утверждать, что современные достижения в области эффективного использования пищевых отходов для создания продуктов с добавленной стоимостью могут обеспечить устойчивость продовольственных систем и стать инструментом для решения глобальной проблемы сохранения ископаемых ресурсов и минимизации экологических рисков для биосферы планеты.

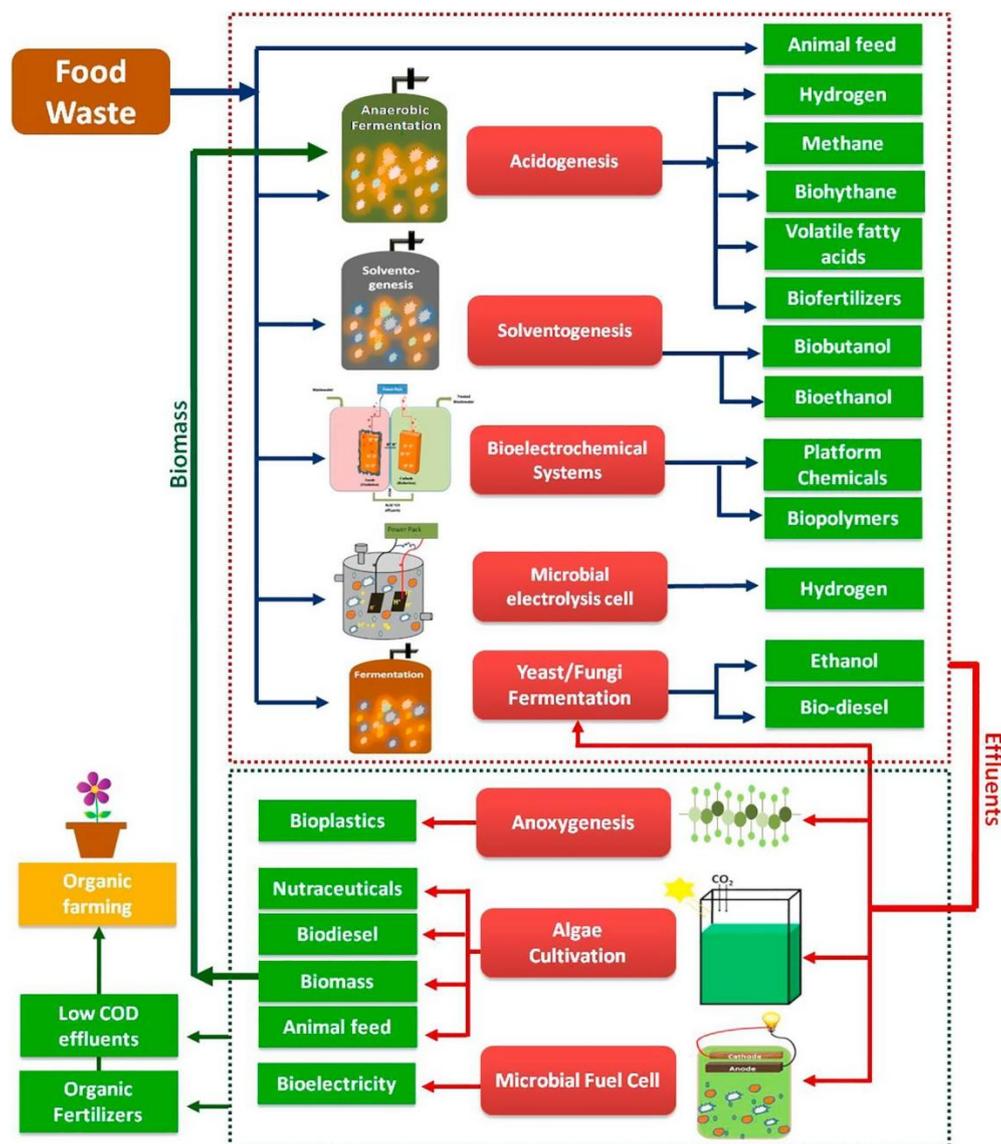
Литература/References

1. Матковский П.Е., Яруллин Р.С., Старцева Г.П., Седов И.В. Биоэтанол:

технологии получения из возобновляемого растительного сырья и области применения // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 6(86). С. 95–105. [Matkovskiy P.E., Yarullin R.S., Startseva G.P., Sedov I.V. Bioethanol: technologies of production from renewable vegetable raw materials and areas of applicaton/ P.E. Matkovskiy. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2010, no. 6 (86), pp. 95–105. (in Russ.)].

2. Ahmed El Mekawy, Sandipam Srikanth, Suman Bajracharya, Hanaa M. Hegab, Poonam Singh Nigam, Anoop Singh, S. Venkata Mohan, Deepak Pant. Food and agricultural wastes as substrates for bioelectrochemical system (BES): The synchronized recovery of sustainable energy and waste treatment. *Food Research International*, 2015, vol. 73, pp. 213–225. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.11.045

3. Chandrasekhar K., Venkata Mohan S. Bio-electrohydrolysis as a pretreatment strategy to catabolize complex food waste in closed circuitry: Function of electron flux to enhance acidogenicbiohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39,



| | | | |
|-----------------------------|---|----------------------------|---|
| Food Waste | Пищевые отходы | Bioelectrochemical Systems | Биоэлектрохимические системы |
| Biomass | Биомасса | Platform Chemicals | Платформенные химикаты |
| Anaerobic fermentation | Анаэробная ферментация | Biopolymers | Биополимеры |
| Acidogenesis | Ацидогенз | Yeast/Fungi fermentation | Ферментация, инициируемая дрожжами/ грибами |
| Animal feed | Корма для животных | Bio-diesel | Биодизель |
| Hydrogen | Водород | Effluents | Сточные воды |
| Methane | Метан | Organic farming | Органическое земледелие |
| Biohythane | Биогитан – гитан, или вотан (водород/метан) | Low COD effluents | Сточные воды с низким содержанием кислорода |
| Volatile fatty acids | Летучие жирные кислоты | Organic fertilizers | Органические удобрения |
| Biofertilizers | Биоудобрения | Anoxygenesis | Аноксигенез |
| Solventogenesis | Сольвентогенез | Bioplastics | Биопластик |
| Biobutanol | Биобутанол | Algae Cultivation | Выращивание водорослей |
| Bioethanol | Биоэтанол | Nutraceuticals | Нутрицевтики |
| Microbial electrolysis cell | Ячейка для микробного электролиза | Bioelectricity | Биоэлектричество |
| | | Microbial fuel cell | Микробный топливный элемент |

Рис. 4. Обзор многомерных подходов к превращению пищевых отходов в продукты на биологической основе в биоэкономике замкнутого цикла

pp. 11411–11422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.035

4. Gildemyn S., Molitor B., Usack J.G., Nguyen M., Rabaey K., Angenent L.T. *Upgrading syngas fermentation effluent using Clostridium kluyveri in a continuous fermentation Biotechnol Biofuels*, 2017. DOI: 10.1186/s13068-017-0764-6.

5. Gn Nikhil, Sarkar Omprakash, Venkata Mohan S. Biohydrogen Production: An Outlook of Fermentative Processes and Integration Strategies. *Optimization and Applicability of Bioprocesses*, 2018, pp. 249–265. DOI: 10.1007/978-981-10-6863-8_12

6. Hafid H.S., Rahman N.A., Abd-Aziz S., Hassan M.A. Enhancement of organic acids production from model kitchen waste via anaerobic digestion. *African Journal of Biotechnology*. Vol. 10(65), pp. 14507–14515. DOI: 10.5897/AJB11.1360.

7. Karmee Sanjib Kumar. Liquid biofuels from food waste: current trends, prospect and limitation. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2016, vol. 53, pp. 945–953. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.041

8. Kirsten J.J. Steinbusch, Hubertus V.M. Hamelers, Caroline M. Plugge, Cees J.N. Buisman. Biological formation of caproate and caprylate from acetate: fuel and chemical production from low grade biomass. *Energy Environ. Sci.*, 2011, vol. 4, pp. 216–224. DOI: 10.1039/c0ee00282h

9. Lee W.S., Chua A.S.M., Yeoh H.K., Ngoh G.C. A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chem. Eng. J.*, 2014, vol. 235 pp. 83–99. DOI: 10.1016/j.cej.2013.09.002

10. Li, Z., Yao, L., Kong, L., Liu, H. Electricity generation using a baffled microbial fuel cell convenient for stacking. *Bioresour. Technol.* 2008, vol. 99, pp.1650–1655. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.04.003

11. Lømmen N., Røstbø E. V. Biowaste to hydrogen or Fischer-Tropsch fuels by gasification – AGibbs energy minimisation study for finding carbon capture potential and fossil carbon displacement on the road. *Energy*, 2020, vol. 211, p. 118996. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118996

12. Marchese M., Chesta S., Santarelli M.,

Lanzini A. Techno-economic feasibility of a biomass-to-X plant: Fischer-Tropsch wax synthesis from digestate gasification. *Energy*, 2021, vol. 228, p. 120581. 10.1016/j.energy.2021.120581

13. Reddy Motakatla, Hayashi Satoru, Choi Dubok, Cho Hoon, Chang YC. Short chain and medium chain fatty acids production using food waste under non-augmented and bio-augmented conditions. *Journal of Cleaner Production*, 2017, p. 176. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.166.

14. Venkata Mohan S., Nikhil G.N., Chiranjeevi P., Nagendranatha Reddy C., Rohit M.V., Naresh Kumar A., Omprakash Sarkar. Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. *Bioresource Technology*, 2016, vol. 215, pp. 2–12. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.130

15. Sarkar Omprakash, Amradi Naresh, Dahiya Shikha, Krishna Kamaja, Yeruva Dileep, Venkata Mohan S. Regulation of acidogenic metabolism towards enhanced short chain fatty acid biosynthesis from waste: metagenomic profiling. *RSC Adv.*, 2016, vol. 6 (22), pp. 18641–18653. DOI: 10.1039/C5RA24254A

16. Sarkar Omprakash, Katari John, Chatterjee Sulogna, Venkata Mohan S. Salinity induced acidogenic fermentation of food waste regulates biohydrogen production and volatile fatty acids profile. *Fuel*, 2020, vol. 276, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117794. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120307900?via%3Dihub>.

17. Sarkar Omprakash, Venkata Mohan S. Pre-aeration of food waste to augment acidogenic process at higher organic load: Valorizing biohydrogen, volatile fatty acids and biohythane. *Bioresour. Technol.*, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.053.

18. Shikha Dahiya, A. Naresh Kumar, J. Shanthi Sraavan, Sulogna Chatterjee, Omprakash Sarkar, S. Venkata Mohan Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 248, pp. 2–12.

19. Shikha Dahiya, Omprakash Sarkar, Swamy Y.V., Venkata Mohan S. Acidogenic fermentation of food waste for volatile fatty acid production with co-generation of biohydrogen. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 182, pp. 103–113. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.007.

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), potorokoii@susu.ru

Цирульниченко Лина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), tcirulnichenkola@susu.ru

Попова Наталия Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), nvrpova@susu.ru

Венката Мохан С., старший научный сотрудник и научный сотрудник по инновациям DBT-Tata, Академия научных и инновационных исследований (AcSIR); Лаборатория биоинженерии и экологических наук, Департамент энергетики и экологической инженерии, CSIR – Индийский институт химической технологии (CSIR-IICT) (г. Хайдарабад, Индия), svmohan@iict.res.in

Поступила в редакцию 7 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/food210202

FOOD WASTE AS RENEWABLE ENERGY SOURCES: PERSPECTIVITY AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

I. Yu. Potoroko¹, L. A. Tcirulnichenko¹, N. V. Popova¹, S. Venkata Mohan²

¹ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

² *CSIR – Indian Institute of Chemical Technology (CSIR-IICT), Hyderabad, India*

The article highlights the main approaches to obtaining alternative energy sources that can replace hydrocarbon fuel. The review focuses on food waste degradation and possible recycling methods. Food waste is defined as a renewable resource with enormous energy, chemical and material potential due to the presence of organic functional substances in them. The authors presented the evidence base for the applicability of food waste, as well as wastewater from food production enterprises for biofuel production. The article discusses the methods of pyrolysis, anaerobic fermentation and the technology of liquefaction of Fischer–Tropsch gases. The processes of bioconversion of food waste are presented as the most promising. However, in order to extract the maximum amount of reducing sugars from food waste, it is necessary to pre-process them, which can be carried out either individually using physical, chemical, physicochemical, biological and enzymatic methods, or in a combination of these strategies. Among the latest approach to the production of bioelectricity from biomass using bacteria, the article provides an overview of the technology of microbial fuel cells (biocatalysis). An increase in energy by microorganisms occurs due to the oxidation of donor electrons and reduction of acceptor electrons. Changing the conditions of the electron acceptor creates the ability to use energy. This hybrid bioelectrochemical system converts chemical energy stored in biodegradable waste into electrical energy through redox reactions using microorganisms acting as biocatalysts. Thus, the authors provided an overview of modern achievements in the efficient use of food waste to create value-added products that will ensure the sustainability of food systems and become a tool for solving the global problem of preserving fossil resources and minimizing environmental risks for the planet's biosphere.

Keywords: anaerobic fermentation, biocatalysis, biofuels, bioconversion of food waste.

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, irina_potoroko@mail.ru

Lina A. Tcirulnichenko, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University (Chelyabinsk), tcirulnichenkola@susu.ru

Natalia V. Popova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, nvpopova@susu.ru

S. Venkata Mohan, Senior Principal Scientist and DBT-Tata Innovation Fellow Professor, Academy of Scientific & Innovative Research (AcSIR); Bioengineering and Environmental Sciences Lab, Department of Energy and Environmental Engineering, CSIR – Indian Institute of Chemical Technology (CSIR-IICT) (Hyderabad, India), svmohan@iict.res.in

Received March 7, 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Отходы пищевых производств как возобновляемые источники энергии: перспективность и технологические решения / И.Ю. Потороко, Л.А. Цирульниченко, Н.В. Попова, С. Венката Мохан // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 16–25. DOI: 10.14529/food210202

FOR CITATION

Potoroko I.Yu., Tcirulnichenko L.A., Popova N.V., Venkata Mohan S. Food Waste As Renewable Energy Sources: Perspectivity And Technological Solutions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 16–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/food210202