

## ЭНЕРГИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**Ду-Джонг Ли,**

*Кафедра химической инженерии, Национальный университет Тайваня,  
Тайбэй, Тайвань*

**Джо-Шу Чанг**

*Кафедра химического машиностроения, Национальный университет  
Ченг Кунг, Тайнань, Тайвань*

**Аннотация.** Выращивание микроводорослей из сточных вод, богатых питательными веществами, с целью устранения загрязнения и использование полученной биомассы микроводорослей в качестве сырья для производства возобновляемой энергии привлекло внимание исследователей. Благодаря высокой скорости роста микроводорослей платформа сточных вод с микроводорослями может рассматриваться как эффективный путь для коммерческого производства энергии микроводорослями. Эта платформа считается перспективной для использования в странах, которые приобретают интенсивную очистку сточных вод и увеличивают долю биоэнергетики.

**Ключевые слова:** микроводоросли; биоэнергетика; топливо; маршруты

### Введение

Мировое производство и импорт энергии в 2018 году составили 19 269 Мтнэ, при этом основными источниками энергии были нефть, уголь и газ. В России общее потребление энергии на душу населения в 2019 году составило 5,3 тнэ, при этом уровень потребления электроэнергии снизился в течение 1990–1998 годов и вернулся к примерно 6,4 МВтч на душу населения в 2019 году. Основным источником энергии для России был газ (54 %), нефть (20 %), уголь (16 %), атомная энергия (7 %), гидроэнергетика (2 %) и биоэнергетика (1 %). В целом, источники энергии для России в основном основаны на ископаемом топливе (> 90 %), в то время как источники энергии из возобновляемых источников были ниже 3 %. Ресурсы биомассы в России огромны, при этом наибольший вклад вносят остатки сельскохозяйственных культур, бытовые отходы, лесные остатки. Тем не менее, биоэнергетический потенциал, используемый в России, относительно невелик. Охват очистными сооружениями в России нуждается в продвижении и модернизации объекта. В этой статье кратко излагается эффективный способ извлечения энергии из сточных вод с использованием платформы микроводорослей, один из конечных продуктов которых является потенциальными источниками биоэнергии, доступными для использования обществом.

### Производство энергии из микроводорослей

Платформа Microalgae (микроводоросли) — многообещающий канал для реализации производства биоэнергии из отходов. Микроводоросли являются быстрорастущими видами из-за высокой эффективности фото-

синтеза, связанной с фиксацией  $\text{CO}_2$ . Относительно высокая продуктивность клеток вместе с высокими темпами накопления внутриклеточных липидов и накопления углеводов сделали биомассу микроводорослей предпочтительным биоресурсом для производства энергии. Стоимость крупномасштабного производства, предварительной и последующей обработки системы сбора микроводорослей обычно выше, чем стоимость ископаемого топлива, и наоборот, если питательные вещества сточных вод, такие как  $\text{N}$  и  $\text{P}$ , могут быть удалены клетками микроводорослей, затраты биогенных веществ и очистки сточных вод может значительно снизиться. Платформа сточных вод микроводорослей для производства энергии представляет определенный интерес. На Рис. 1 схематично показана схема с акцентом на производство трех видов биотоплива: биодизель, ферментативное жидкое топливо и газообразное топливо. Удаление загрязняющих веществ является преимуществом использования данного процесса при очистке сточных вод, что может соответствовать Национальному проекту «Экология» (2019–2024 гг.). При надлежащем проектировании и эксплуатации на практике ожидается избыток энергии для такого маршрута преобразования отходов в энергию.



**Рис. 1.** Платформа сточных вод на основе микроводорослей для производства биоэнергии.

Микроводоросли могут расти в различных типах сточных вод, в зависимости от физиологии применяемых видов. В аспекте производства биотоплива обычно приветствуется биомасса, обогащенная липидами и углеводами, которая может быть легко переработана после сбора, поскольку в клетках обычно отсутствует лигнин во внутриклеточных веществах. Одним из основных препятствий процесса является этап сбора, который требует больших затрат энергии (20–30 % операционных затрат) для извлечения клеток уменьшенного размера из разбавленной суспензии. Центрифугирование, фильтрация и флокуляция, флотация и седиментация — это общепринятые процессы сбора урожая. Для клеток с высоким содержанием влаги собранные клетки нуждаются в немедленной обработке, поскольку порча может произойти в течение нескольких часов.

Использование палетизации — это недавно предложенный способ сбора клеток микроводорослей с использованием гранулированных нитчатых грибов для уплотнения клеток в гранулы.

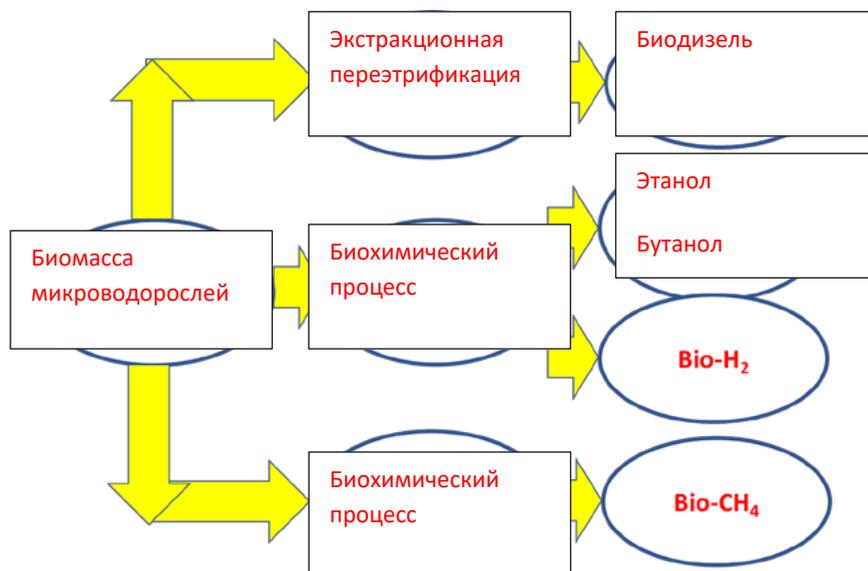


Рис. 2. Маршруты производства энергии из микроводорослей

Следующим этапом является извлечение активных веществ из тела клетки. Высвобождение продуцируемых клеточных соединений из клеток микроводорослей необходимо, поскольку биологические или химические реакции могут осуществляться только в окружающей среде без ограничения клеток. Процессы липидной экстракции включают физическую экстракцию, экстракцию растворителем и сверхкритическую жидкостную экстракцию. Процесс добычи должен быть быстрым, специфичным, с низкими потерями и минимальным воздействием на окружающую среду.

В ходе одного из последующих преобразований, реакции переэтерификации, могут образовываться метиловые эфиры жирных кислот (FAME), при этом неочищенное масло микроводорослей превращается в низкомолекулярное нетоксичное биоразлагаемое биотопливо. Переэтерификацию можно разделить на превращение липидов в глицериды и, наконец, в FAME и глицерин. Применяются катализаторы, в том числе щелочные и кислотные, причем последние используются в коммерческих целях. В этом процессе следует избегать омыления, чтобы снизить выход биотоплива. Альтернативным катализатором являются твердые катализаторы для предотвращения образования воды и омыления. Прямая переэтерификация — это комбинированный одностадийный процесс экстракции и переэтерификации, позволяющий снизить производственные затраты.

Другой путь преобразования — это ферментация для производства ферментативного топлива, например этанола и бутанола из углеводов микроводорослей. Этанол — заменитель бензина в двигателях внутреннего сгорания. Бутанол имеет преимущества: высокое энергосодержание, высокий процент смешивания с бензином, низкое давление паров. Микроводоросли имеют низкое содержание лигнина, поэтому их можно сбраживать с образованием спиртов. Содержание углеводов в микроводорослях может достигать 60 % при азотном голодании, поэтому это перспективное сырье для производства этанола. Превращение углеводов микроводорослей в биоэтанол начинается с предварительной обработки клеточной массы, которая извлекает целлюлозу из биомассы для стадии осахаривания. Возможные предварительные обработки включают измельчение, обработку щелочью / кислотой, микроволновую печь, ультразвук и паровой взрыв. Предварительная обработка, как правило, является дорогостоящей, в то время как в некоторых процессах могут образовываться токсичные вещества, препятствующие дальнейшей ферментации. Процессы одновременного осахаривания и ферментации (SFF) были разработаны для облегчения работы и контроля процесса. Ферментативное осахаривание углеводов микроводорослей или целлюлолиз дает единицы глюкозы для ферментации. Ферментативное осахаривание происходит медленно, но требует пониженного энергопотребления и генерирует минимальное количество ингибиторов. По сравнению с биоэтанолом производство бутанола из углеводов микроводорослей находится на стадии младенческого развития. Ферментация АВЕ обычно применяется для производства биобутанола, в то время как снижение рН при ферментации представляет собой одно из основных ограничений для его коммерческого производства.

Биоводород и биометан представляют собой газообразные ферментативные топлива из углеводов микроводорослей. Прямое производство биогидрогена микроводорослями, как правило, происходит невысоко. Альтернативный путь — темное брожение для производства биоводорода из углеводов микроводорослей. Путь темного брожения является частью анаэробного процесса пищеварения, в то время как ингибирование образования метана может привести к накоплению водорода. Через путь ферментации АВЕ спирты и биоводород могут генерироваться одновременно. Однако коммерческое производство биогидрогена до сих пор не практикуется, поскольку степень превращения низкая, а чистота невысока. Комбинированный производственный процесс темновой ферментации и фотоферментации является многообещающим способом максимизировать степень использования субстрата для получения биогидрогена. Еще одно потенциальное расширение — объединение темного брожения и метаногенного процесса для получения биометана. Биометан — это конечное газообразное топливо, получаемое путем анаэробного сбраживания, которое в настоящее время является наиболее распространенным возобновляемым источником энергии, широко

применяемым в европейских странах. Биомасса микроводорослей имеет низкое соотношение  $C / N$ , поэтому совместное переваривание с другими субстратами с высоким соотношением  $C / N$  обычно является вариантом для максимального увеличения выхода биометана. Вплоть до настоящего времени биометан также является единственной биоэнергетикой, которая имеет шанс компенсировать собственные эксплуатационные расходы за счет продажи на рынке.

Для выращивания микроводорослей в промышленных масштабах требуется огромное количество воды, которая может конкурировать с источниками питьевой воды, если необходимо выращивать свежие микроводоросли. Кроме того, питательные вещества, необходимые для выращивания микроводорослей, включая азот и фосфаты, будут дорогими и потребляют много углерода, если потребуется внешняя дозировка удобрений. Сильные сточные воды, включая сточные воды, фильтрат со свалок и другие сельскохозяйственные и промышленные сточные воды, являются многообещающей средой, содержащей избыток воды и питательных веществ, причем питательные вещества рассматриваются как субстраты для роста микроводорослей. Если сточные воды могут обрабатываться микроводорослями для удаления питательных веществ и производства избыточной биомассы, последняя может быть адекватным сырьем для производства биоэнергии, как описано в этом разделе. При этом может быть реализована платформа для сточных вод с микроводорослями, что считается многообещающим вариантом для решения текущих задач развития России.