

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, НОВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.95.504.7

Эффективность производства биодизеля из микроводорослей

© 2014 г. Чернова Н.И.¹, Киселева С.В.¹, Попель О.С.²

МГУ им. М.В. Ломоносова¹ – Объединенный институт высоких температур РАН²

e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Биомасса высокоурожайных водорослей является перспективным нетрадиционным сырьем для биоэнергетики, в том числе для получения из нее энергии и моторного топлива. В статье представлен анализ эффективности преобразования солнечной энергии в микроводорослевое биотопливо на основе как общих теоретических подходов, так и экспериментальных результатов, полученных в различных пилотных проектах. Рассматриваются также некоторые данные об экономической эффективности получения биотоплива из водорослей. Формулируются возможные пути повышения эффективности энергетического использования микроводорослей.

Ключевые слова: микроводоросли, биотопливо, биодизель, фотосинтез, преобразование энергии.

DOI: 10.1134/S0040363614060010

Биоэнергетика – активно развивающийся сектор экономики, основанный на источниках энергии органического происхождения, используемых для производства тепла, электричества и моторных топлив. Суммарное производство этанола и биодизеля из различных видов биомассы в 2012 г. достигло 105 млрд л, или около 3% всего объема потребляемых в мире моторных топлив. Удельные затраты на производство жидких биотоплив по мере развития технологий снижаются и по различным данным составляют для биодизеля, производимого из сои, семян рапса, отходов производства растительных масел и животных жиров, около 1 дол. в расчете на 1 л; в США производство биоэтанола из кукурузы обходится около 40 центов за 1 л [1].

В последние годы все большее внимание производителей биотоплива привлекает биоэнергетический потенциал фотосинтезирующих микроводорослей, причем финансирование исследований и разработок в этой области неуклонно растет [2–5]. Производство биодизельного топлива из микроводорослей вызывает повышенный интерес в связи с тем, что содержание липидов в некоторых из них (например, *Botryococcus braunii*, *Dunaliella*, *Nannochloris*, *Stichococcus* и др.) при оптимальных условиях культивирования может быть высоким (до 80%), а урожайность их по биомассе и маслу (липидам) превышает соответствующую урожайность наземных растений в десятки раз [6–8]. Технологические преимущества куль-

тивирования микроводорослей позволяют им успешно конкурировать с наземными, в том числе с продовольственными культурами (использование площади, водных ресурсов, удобрений). Доказана возможность выращивания микроводорослей на неплодородных, рекультивируемых землях, водных акваториях, а также адаптации штаммов водорослей к росту на соленых водах и использования в качестве источников биогенных элементов сточных вод. Выращивание и энергетическое использование микроводорослей, в отличие от традиционных сельскохозяйственных культур, не усиливает продовольственной проблемы. В настоящей статье предпринята попытка анализа показателей энергетической и экономической эффективности искусственного выращивания микроводорослей и получения из них моторных топлив, в частности биодизеля, на основе собственных энергетических оценок, а также с учетом опубликованных другими авторами экспериментальных и расчетных данных.

Теоретические оценки максимальной продуктивности микроводорослей

При анализе возможностей использования фотосинтезирующих микроводорослей (ФМ) как источника сырья для биотоплива возникают следующие принципиальные вопросы:

каково соотношение энергетических затрат на производство липидов (масла) и энергии полученного продукта;

возможны ли в принципе те высокие урожайности, которые анонсируются различными авторами и определяют перспективность микроводо-

¹ 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1. МГУ им. М.В. Ломоносова.

² 127412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2. ОИВТ РАН.

рослей как источника топлива в *промышленных масштабах*.

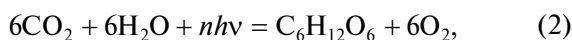
Оценим эффективность преобразования энергии света в энергию химических связей (биомасса и масла) микроводорослей. Нарращивание биомассы микроводорослей обусловлено преобразованием энергии солнечного излучения в процессе реакции фотосинтеза, причем можно считать, что ее масса M (кг) пропорциональна поглощенной фотосинтезирующим организмом световой энергии E (МДж) и может быть получена из уравнения энергетического баланса

$$qM = KE, \quad (1)$$

где q — удельное энергосодержание биомассы, равное для фотосинтезирующих микроводорослей 21–22 МДж/кг [6], а K — интегральный коэффициент эффективности преобразования световой энергии в органическое вещество.

Далее рассматриваются количественные оценки факторов, которые определяют значение интегрального коэффициента K . На образование органического вещества растениями используется только часть спектра солнечного излучения: так называемая фотосинтетически активная радиация (ФАР), доля которой в полном световом энергетическом потоке составляет не более 50% [9–11]. В дальнейших оценках будем считать $K_{\text{ФАР}} = 0.5$.

Согласно общепринятому уравнению фотосинтеза



где $h\nu$ — энергия одного фотона; n — число фотонов. На восстановление одной молекулы CO_2 до глюкозы требуется от 8 до 10 фотонов из диапазона ФАР [11]. С учетом энергии одного кванта солнечного света, соответствующей средней длине волны в пределах ФАР, равной примерно 680 нм, энергия 1 моля квантов фотонов составляет около 200 кДж/моль. При квантовом расходе, равном 8, для восстановления 1 моля CO_2 требуется около 1.6 МДж. Если в качестве устойчивого продукта фотосинтеза взять глюкозу, имеющую теплоту сгорания в расчете на 1 моль восстанавливаемого CO_2 , равную 470 кДж, то превращение энергии света в энергию органического вещества осуществляется с теоретической, оцениваемой как **отношение энергосодержания получившегося органического вещества к суммарной энергии всех вступивших в реакцию фотосинтеза фотонов**, эффективностью $K_{\text{фс}} = 470/1600 \approx 0.3$ (30%).

Важно отметить, что квантовый расход фотосинтеза в коротковолновой и длинноволновой ФАР практически одинаков, поэтому в зависимости от спектрального состава света эффективность утилизации лучистой энергии может отклоняться в сторону как увеличения (при использовании длинноволнового потока), так и уменьшения —

для более короткой волны падающего излучения. Заметим, что в 1966 г. В.Е. Семененко с соавторами удалось на практике значительно повысить КПД фотосинтеза одноклеточной зеленой микроводоросли *Chlorella* sp. именно увеличением доли длинноволнового излучения ($\lambda = 610\text{--}710$ нм) в пределах диапазона фотосинтетически активной радиации [12]. В работах [10, 11] максимально возможная теоретическая эффективность фотосинтеза на молекулярном уровне оценивается в 33%.

С учетом изложенного интегральный коэффициент эффективности преобразования световой энергии в органическое вещество имеет максимальное значение

$$K = K_{\text{ФАР}}K_{\text{фс}} = 0.5 \times 0.3 = 0.15 \text{ (или 15\%)}. \quad (3)$$

Следует отметить, что в реальности $K_{\text{фс}}$ существенно уменьшается из-за факторов, ограничивающих эффективность поглощения света, и диссипационных потерь на дыхание и фотодыхание. На практике это уменьшение составляет 50–65% [13] исходного значения, т.е. $K_{\text{фс}}$ не превышает 0.11–0.12. В результате максимальное значение интегрального коэффициента эффективности преобразования световой энергии в органическое вещество K снижается примерно до 0.06 (6%).

Таким образом, продуктивность фотосинтезирующих микроводорослей (как и наземных растений) ограничивается значением падающей солнечной радиации E и коэффициентами $K_{\text{фс}}$ и $K_{\text{ФАР}}$.

Для наиболее “солнечных” районов Земли годовое поступление солнечной радиации на ее поверхность E составляет примерно 10 000 МДж/(м² · год) [или в среднем около 7.5 кВт · ч/(м² · день)]. Используя соотношение (1), нетрудно определить, что максимально возможное получение биомассы с 1 м² площади будет равно $M = 28$ (кг/м²)/год [280 (т/га)/год, или в среднем 75 (г/м²)/сут]. Для южных регионов России поступление солнечной радиации на поверхность земли составляет примерно 7000 МДж/(м² · год) [или в среднем около 5 кВт · ч/(м² · день)] [14], и тогда $M = 20$ (кг/м²)/год [200 (т/га)/год или в среднем 55 (г/м²)/сут]. Заметим, что урожаи, например, кукурузы по зеленой массе 20 (т/га)/год считаются рекордными, но они на порядок меньше приведенных предельных теоретических оценок.

Для определения теоретически возможной продуктивности биомассы микроводорослей по маслу $M_{\text{масло}}$ энергоемкость масла принимается $q_{\text{масло}} \approx 35.5$ МДж/кг и сухой биомассы после экстракции жиров — $q_{\text{сух}} \approx 15.6$ МДж/кг. Тогда вместо выражения (1) энергетический баланс будет иметь вид

$$\left(q_{\text{масло}} + \frac{1-\alpha}{\alpha} q_{\text{сух}} \right) M_{\text{масло}} = KE, \quad (4)$$

где α – доля масла (липидов) в общей массе микроводорослей.

При $\alpha = 20\%$ для наиболее солнечных регионов Земли предельная продуктивность по маслу составит около 60 (т/га)/год, а при $\alpha = 80\%$ – около 150 (т/га)/год. В климатических условиях юга России эти значения не будут соответственно превышать 45 и 105 (т/га)/год.

Таким образом, максимальные значения продуктивности микроводорослей по липидам [до 100 (т/га)/год], представленные в литературе (например, [15]), соответствуют предельным теоретическим значениям даже в природно-климатических условиях южных областей России. Однако для достижения высокой продуктивности микроводорослей по липидам принципиально важно обеспечить максимально возможные значения $K_{\text{фс}}$ и α .

Достигнутые на практике показатели эффективности культивирования микроводорослей и получения липидов

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по культивированию микроводорослей в лабораторных и приближенных к промышленным условиям. Культивирование микроводорослей осуществляется как в открытых прудах, так и в закрытых фотобиореакторах (ФБР).

Целью программы *Aquatic Species Program* (ASP, USA, 1978–1996 гг.) являлась апробация возможности получения биодизеля из микроводорослей [16]. При реализации проекта была создана коллекция водорослей, содержащая более 3000 штаммов. Проводилось длительное крупномасштабное культивирование микроводорослей в открытых прудах и трубчатых ФБР в климатических условиях штата Нью-Мексико, США. Продуктивность по биомассе в открытых прудах в течение длительного периода составляла в этом проекте в среднем более 20 (г/м²)/сут [73 (т/га)/год], а в отдельные кратковременные периоды поднималась до 70 (г/м²)/сут [17, 18]. Вместе с тем было показано, что поддерживать монокультуру микроводорослей в открытых системах более нескольких недель практически невозможно вследствие контаминации прудов другими организмами. Важным результатом исследований стал также установленный экспериментальный факт, что для большинства штаммов микроводорослей достаточное обеспечение культур азотом (при отсутствии иных лимитирующих факторов) способствует высокой скорости роста культур, а дефицит азота приводит к увеличению содержания липидов в клетках при одновременном существенном уменьшении скорости их роста. Иными словами, было показано, что одновременное достижение высокой продуктивности и высокого содержания липидов при культивировании микроводорослей

невозможно. Авторы проекта обратили также внимание на необходимость оптимизации процедур сбора урожая и выделения из него липидов.

К аналогичным выводам пришла группа из японского *Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE, 1990–1999 гг.)*. Проект RITE, так же как и программа ASP, был нацелен на создание коллекции фотосинтезирующих микроводорослей – перспективных источников биотоплива и изучение возможности решения проблемы секвестирования CO₂ с их помощью. Основной акцент был сделан на использование и усовершенствование фотобиореакторных систем, однако ни один из разработанных типов фотобиореакторов, по заключению авторов, не позволил достичь приемлемой рентабельности при промышленном производстве. В результате RITE прекратил исследования биологической фиксации CO₂ в 1999 г., переключившись на его геологическое секвестирование.

В период с 1997 по 2001 г. был осуществлен еще один крупный исследовательский проект на Гавайях [6], направленный на апробацию и отработку стратегии двухстадийного культивирования микроводорослей для повышения выхода липидов, а также на продвижение на рынок нового коммерческого водорослевого продукта. Объектом культивирования была выбрана зеленая микроводоросль *Haematococcus pluvialis*, которая является продуцентом масла и ценного каротиноидного пигмента астаксантина. На первой стадии, осуществляемой в закрытом (трубчатом) фотобиореакторе, поддерживались постоянные оптимальные условия, способствующие непрерывному клеточному делению и предотвращающие контаминацию культуры выращиваемых микроводорослей другими организмами. На второй стадии клетки фотосинтезирующих микроорганизмов подвергались ограничению в питательных веществах, избыточному освещению и другим стрессам, которые вели к ускоренному синтезу целевых продуктов – масла и астаксантина. Стрессовые условия создавались при перенесении выращенной культуры из ФБР в открытые культиваторы. Итоговая продуктивность по биомассе при двухстадийном культивировании составила от 38.1 (в среднем) до 91.8 (т/га)/год (максимально). При энергосодержании сухой биомассы 21.9 МДж/кг общая энергопродуктивность *H. pluvialis* составила в среднем 83.4 (МДж/м²)/год, а максимально – 201 (МДж/м²)/год. При поступающей солнечной радиации на уровне 10000 (МДж/м²)/год полученный в данном эксперименте коэффициент преобразования солнечной энергии оказывается в среднем равным 0.8% для полного спектра падающей солнечной радиации и 1.7% для ФАР. Содержание масла в *H. pluvialis* в открытых культиваторах в условиях стресса достигало в среднем

Таблица 1. Энергетический баланс систем культивирования микроводорослей для условий Британской Колумбии [19]

| Исходные характеристики систем культивирования | Открытые русловые культиваторы | Фотобиореакторы |
|--|--------------------------------|-----------------|
| Среднесуточная урожайность биомассы по сухому веществу, г/м ² | 9.38 | 15.3 |
| Содержание масла, % | 15 | 25 |
| Энергетический баланс, МДж/л масла: | | |
| потребление электроэнергии | 32.0 | 38.0 |
| энергетический эквивалент потребления удобрений | 20.4 | 12.3 |
| потребление дополнительной энергии (всего) | 52.4 | 50.3 |
| энергосодержание водорослевого масла | 37.0 | 37.0 |
| энергосодержание остатка биомассы (после выделения липидов) | 46.7 | 21 |
| энергетический эквивалент “недовыброса” CO ₂ для культивирования биомассы | 8.4 | 3.8 |
| полезная энергия (всего) | 92.1 | 61.8 |
| Энергетический выигрыш | 39.7 | 11.5 |
| Отношение полезной энергии к дополнительным энергозатратам | 1.76 | 1.23 |

25–30%; в результате продуктивность микроводорослей по маслу составила около 11.4 (т/га)/год (в среднем за год) и до 27.5 (т/га)/год в кратковременные периоды.

Важно иметь в виду, что процессы культивирования микроводорослей, сбора урожая и выделения масла сопряжены не только с использованием солнечной энергии, но и с дополнительными энергетическими затратами. Наиболее существенные затраты дополнительной энергии связаны с прокачкой воды через биореакторы и подачей CO₂. Кроме того, для выращивания микроводорослей необходимы питательные вещества, производство которых также сопряжено с энергетическими затратами. Подробный оптимизационный анализ таких затрат для условий Британской Колумбии (Канада) был проведен в работе [19]. Расчеты выполнялись как для открытых русловых культиваторов, так и для фотобиореакторов. Результаты оценок приведены в табл. 1.

Видно, что суммарное энергосодержание конечных продуктов превышает затраты дополнительной энергии даже без учета энергетического эквивалента “недовыброса” CO₂ при культивировании микроводорослей. При этом в рассмотренных случаях решающим положительным фактором является энергия отходов биомассы после экстракции липидов, что заставляет практически во всех проектах предусматривать полную переработку биомассы. В противном случае производство биодизеля с энергетической точки зрения может оказаться “убыточным”: отношение энергосодержания масла к дополнительным энергозатратам составляет 0.7 для обеих схем культивирования.

Вместе с тем практическая эффективность внедрения той или иной технологии в конечном

итоге определяется экономическими показателями. В этом плане представляют интерес экономические оценки, сделанные на основе данных ASP-проекта. Они показали, что стоимость биодизеля из ФМ в зависимости от продуктивности микроводорослей может составлять от 39 до 127 дол. за баррель или 26–86 центов за литр. При этом производство биомассы осуществлялось только в открытых культиваторах, а для обогащения среды использовался CO₂ из дымовых выбросов тепловых электростанций. Продуктивность по биомассе составляла от 30 до 60 (г/м²)/сут при содержании масла 40%. В Гавайском проекте при двухстадийном культивировании микроводорослей оценка себестоимости биодизеля дала 56 дол. за баррель в ценах 2003 г. (около 40 цент/л), когда цена на нефть на мировом рынке была на уровне 55 дол. за баррель.

Экономические оценки производства водорослевого биодизеля, выполненные в работе [19] для условий Британской Колумбии, в отличие от указанных, дали более пессимистичные результаты. Они были сделаны как для открытых культиваторов, так и для закрытых фотобиореакторов. Рассматривалась круглогодичная и сезонная (с апреля по сентябрь) эксплуатация культиваторов. Во втором случае двукратно снижались капитальные затраты и отсутствовала необходимость подогрева воды. Продуктивность по биомассе варьировалась в диапазоне от 10 до 25 (г/м²)/год с содержанием липидов от 15 (культиваторы) до 25–35% (биореакторы). Было показано, что даже при самом оптимистичном сценарии производства биодизеля ни один из них не привел к паритетным, по сравнению с ископаемым сырьем и топливом

из наземных масличных растений (канола), затрат для тех же климатических условий.

В структуре затрат на получение водорослевого масла капитальные затраты на создание открытых культиваторов достигали 50%, а для фотобиореакторов превышали 60%, текущие затраты на удобрения и дополнительную энергию составляли около 25%, остальные затраты относились к оплате труда. В итоге себестоимость 1 л водорослевого масла для открытых культиваторов оценивалась примерно в 2.5 дол/л, а для фотобиореакторов — около 7 дол/л. Авторами расчетов отмечалось, что экономические показатели производства биотоплива из водорослей могут быть улучшены при одновременном производстве энергоносителей и особо ценных сопутствующих продуктов, например астаксантина и других пигментов. Эта идея не нова и рассматривалась разными авторами [6 и др.]. Полученные довольно пессимистичные результаты для открытых культиваторов и фотобиореакторов связаны в немалой степени с климатическими условиями места предполагаемого культивирования микроводорослей (Канада). Это еще раз подтверждает необходимость учета особенностей каждого проекта и региона при выборе стратегий организации производства.

Возможные пути повышения эффективности энергетического использования микроводорослей

Согласно изложенным фактам, для повышения эффективности и конкурентоспособности технологий производства биотоплива на основе выращивания высокопродуктивных микроводорослей необходимо следующее.

1. *Обеспечение высокой эффективности преобразования световой энергии в биомассу и достижение высокого содержания липидов в биомассе микроводорослей.*

Доступная солнечная энергия является основным фактором повышения продуктивности микроводорослей. Как было показано, получение высокой урожайности по биомассе возможно лишь в районах с максимальной солнечной радиацией. При этом важным фактором являются температурные условия окружающей среды и особенно отсутствие резких суточных перепадов. В некоторых случаях рентабельно только сезонное культивирование микроводорослей. При заданном спектре солнечного излучения, по-видимому, существенно повысить долю фотосинтетически активной радиации ($K_{ФАР}$) вряд ли возможно. Вместе с тем имеются значительные резервы повышения эффективности преобразования энергии света в энергию органического вещества ($K_{ФС}$), которая пока далека от теоретического предела. Основными направлениями повышения $K_{ФС}$ являются:

- снижение потерь поступающего в биореактор солнечного излучения, связанных с затенени-

ем и отражением излучения, неоптимальными пространственными геометрическими характеристиками, а также с особенностями используемой технологии выращивания водорослей в открытых и закрытых культиваторах;

- повышение эффективности использования поступающих фотонов путем распределения падающей солнечной энергии по всей поверхности клетки, а также селекцией с помощью мутации или генной инженерии, которая увеличивает толерантность водорослей к высоким уровням радиации;

- повышение эффективности аккумуляции энергии в биомассе, т.е. увеличение доли энергии, поступившей в клетку, которая тратится на прямое запасание ее в виде биомассы, а не на функционирование клетки. Для этого требуются дополнительные детальные исследования, однако известно, что количество такой энергии напрямую зависит от таких факторов, как вид водорослей и условия культивирования. В работе [20] анализ “цены жизни” был сделан на основе экспериментальных данных, где либо принималось во внимание только дыхание, либо рассматривались более полно энергетические потребности клетки. Так, согласно [13], эффективность аккумуляции энергии биомассой равна 65%, в [21] для водорослей различных видов она оценивается в диапазоне 47–86%, в [17] — 87.5%, в [22] — от 11 до 79%, в [23] — 34%;

- обеспечение высокого содержания липидов в биомассе микроводорослей, которое зависит не только от поступления энергии, но и от вида водоросли и подобранных условий культивирования. Теоретически максимальное значение этой величины до сих пор неизвестно. Так, в работе [7], где представлен наиболее полный обзор результатов исследований содержания липидов в клетках водорослей, оно изменяется от 15 до 77%. Показано, что одновременное достижение высокой продуктивности и высокого содержания липидов при культивировании микроводорослей невозможно. Индукция биосинтеза липидов может быть достигнута путем создания физиологического стресса: голодания по азоту и/или фосфору, воздействия тяжелых металлов, осмотического стресса, интенсивного или ослабленного освещения определенного спектрального состава, pH, температурного режима и др. В [24] для липидосодержащих зеленых водорослей обосновывается значение 46% по сухому веществу при стрессовых условиях культивирования.

2. *Снижение затрат дополнительной энергии на обеспечение культивирования водорослей.* Эти затраты связаны с основными технологическими стадиями процесса культивирования: перемешиванием и прокачкой суспензии микроводорослей в открытых культиваторах и ФБР, сбором урожая микроводорослей, экстракцией, очисткой и дру-

Таблица 2. Основные виды энергозатрат процесса культивирования микроводорослей и методы их сокращения

| Вид энергозатрат | Способы уменьшения энергозатрат |
|--|---|
| Производство биогенных элементов для культивирования микроводорослей | Использование для приготовления питательных сред: отходов животноводства; продуктов метанового брожения; морских и геотермальных вод; CO ₂ , NO _x , SO _x из дымовых выбросов ТЭС |
| Перемешивание | Использование возобновляемых источников энергии (солнечные, ветровые и комбинированные установки) |
| Сбор биомассы | Применение методов фильтрации, флотации, флокуляции; сушка с использованием возобновляемых источников энергии |
| Поддержание оптимального температурного и светового режима культивирования микроводорослей | Использование светодиодных источников; сокращение энергозатрат за счет сбросного тепла ТЭС, АЭС и возобновляемых источников энергии |
| Капитальное строительство | Употребление дешевых и доступных материалов многоразового использования |
| Водоснабжение | Использование морской и геотермальной воды, селекция штаммов микроводорослей, адаптированных к средам на морской и геотермальной воде Использование городских сточных вод и водоемов-охладителей АЭС и ТЭС |

гими операциями по извлечению масла. Дополнительная энергия затрачивается на непрерывную подачу в водный раствор углекислого газа, одним из перспективных источников которого могут служить продукты сгорания топлива электростанций. Для создания оптимальной питательной среды используются биогенные элементы (химические реактивы), производство которых также требует значительных энергозатрат. В связи с этим представляет интерес использование сточных вод и/или геотермальных водных источников, содержащих широкий спектр химических веществ. В целом, в области сокращения указанных дополнительных энергетических затрат имеются значительные резервы, некоторые из которых апробированы в ряде исследований (табл. 2). При этом важным аспектом проблемы, оказывающим существенное влияние на энергетические и экономические показатели, являются утилизация отходов производства биотоплива и извлечение попутных ценных компонентов.

Для культивирования микроводорослей можно применять экономичные источники искусственного света, например светодиодные. При этом возможен подбор спектрального состава излучения преимущественно в области ФАР. Применение распределенных искусственных источников света позволяет получить равномерное облучение непосредственно внутри биореактора,

исключить оптические потери (отражение, затенение), характерные для внешнего солнечного излучения. Изучение влияния различных спектров светового потока и его интенсивности на продуктивность и накопление липидов микроводорослями проводилось ранее в нашей стране и за рубежом. Однако в качестве источников света в основном использовались специализированные лампы со сменными фильтрами. С помощью светодиодной техники можно подобрать для микроводорослей наиболее «продуктивные» диапазоны облучения в пределах ФАР, а также создать стрессовые условия (высокий уровень инсоляции в узком диапазоне длин волн), позволяющие повысить содержание липидов в биомассе. Полученные результаты в сравнении с ранее проведенными исследованиями показывают, что реакция на изменение спектра облучения и интенсивность светового потока является видо- и даже штаммоспецифичной. Кроме того, весьма важно изучить влияние спектра на качественный состав биомассы (содержание липидов, белков, углеводов).

Вместе с тем при использовании искусственных источников света возникает принципиальный вопрос о первичном источнике энергии. Это может быть относительно дешевая электроэнергия обычных или атомных электростанций, отбираемая в период минимального суточного потребления. В перспективе представляется возможным

использовать электроэнергию, вырабатываемую энергоустановками на возобновляемых источниках (ветровых, солнечных и др.). Использование искусственного света для выращивания микроводорослей в целях получения моторных топлив требует специального технико-экономического анализа. Однако в будущем при продолжении роста цен на нефть и снижении стоимости энергии от возобновляемых источников такая технология может стать вполне привлекательной.

3. Оптимизация конструкций культиваторов и биореакторов для снижения капитальных затрат на их создание.

Как уже отмечалось, доля капитальных затрат в стоимости конечного продукта может составлять 50% для открытых культиваторов и более 60% для закрытых биореакторов. В связи с этим оптимизация конструкции этих устройств является важнейшей задачей.

Таким образом, анализ энергетических балансов преобразования солнечной энергии в биомассу липидосодержащих микроводорослей подтверждает принципиальную возможность достижения рекордных продуктивностей по биомассе и маслу, что может определить перспективы конкурентоспособности водорослевого биодизеля. При оптимальной организации процесса энергосодержание конечных продуктов может превышать затраты дополнительной энергии на выращивание микроводорослей даже без учета энергетического эквивалента “недовыброса” CO₂ при культивировании микроводорослей. При этом значительную долю в общем энергосодержании получаемых продуктов составляет энергия отходов биомассы после экстракции липидов. Производство ценных сопутствующих продуктов с высокой добавочной стоимостью (астаксантин, β-каротин, фикоцианин, хлорофилл) также может существенно повысить рентабельность производства. Имеются значительные резервы усовершенствования технологии, связанные с повышением эффективности преобразования световой энергии в биомассу, увеличением содержания липидов в биомассе микроводорослей, снижением затрат дополнительной энергии на их культивирование, оптимизацией конструкций культиваторов и биореакторов с обеспечением снижения капитальных затрат на их создание. Для реализации этих резервов требуются расширенные исследования в данной междисциплинарной области с участием специалистов из различных сфер науки и техники.

Список литературы

1. **REN21. 2013.** Renewables 2013 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). <http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx>.
2. **The Oilgae Digest – Home of Algal Energy.** http://www.oilgae.com/ref/report/digest/Oilgae_Digest_Preview.
3. **Algae 2020 – V. 2: Global Biofuels, Drop-In Fuels, Biochems and Commercial Market Forecasts (2011 Update).** <http://www.emerging-markets.com/algae/Algae2020StudyandCommercializationOutlook>.
4. **Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Киселева С.В.** Использование биомассы для производства жидкого топлива: современное состояние и инновации // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 28–35.
5. **Соловченко А.Е.** Физиологическая роль накопления нейтральных липидов эукариотическими // Физиология растений. 2012. Т. 59. № 2. С. 192–202.
6. **Huntley M., Redalje D.** CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2007. V. 12. P. 573–608.
7. **Chisti Y.** Biodiesel from Microalgae // Biotechnology Advances. 2007. V. 25. P. 294–306.
8. **Микроводоросли** в качестве сырья для получения биотоплива / Н.И. Чернова, Т.П. Коробкова, С.В. Киселева, С.И. Зайцев // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 9. С. 68–74.
9. **Лархер В.** Экология растений. М.: Мир, 1978.
10. **Кузнецов Вл.В., Дмитриева Г.А.** Физиология растений: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2005.
11. **Эдвардс Дж., Уокер Д.** Фотосинтез C3- и C4-растений: механизмы и регуляция. М.: Мир, 1986.
12. **Изучение** фотосинтетической продуктивности и к.п.д. утилизации лучистой энергии хлореллы в зависимости от спектрального распределения энергии в равно-энергетическом световом поле / В.Е. Семеновко, М.Б. Зимин, М.Г. Владимирова, Г.Л. Клячко-Гурвич, М.В. Соколов, А.А. Ничипорович // Физиология растений. 1966. Т. 13. Вып. 6. С. 949–957.
13. **Dubinsky** optimizing algal biomass production in outdoor pond: a simulation model / A. Sukenik, R.-S. Levy, Y. Levy, P.-G. Falkowski, Z. Dubinsky // J. Appl. Phycol. 1991. № 3. P. 191–201.
14. **Атлас** ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец, С.В. Киселева, Е.Н. Терехова. М.: Изд-во МФТИ, 2010.
15. **Моисеев И.И., Тарасов В., Трусов Л.И.** Эволюция биоэнергетики. Время водорослей // Chem. J. 2009. Dec. P. 24–129.
16. **A Look** Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae, Golden, CO / J. Sheehan, T. Dunahay, J. Benemann and P. Roessler. National Renewable Energy Institute, NREL/TP-580-24190, 1998.
17. **Goldman J.** Outdoor algal mass cultures—II. Photosynthetic yield limitations // Water Res. 1979. № 13. P. 119–136.
18. **High** algal production rates achieved in a shallow outdoor flume / E.A. Laws, S. Taguchi, J. Hirata, L. Pang // Biotechnology and Bioengineering. 1986. № 28. P. 191–197.

19. **Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E.** Microalgae technologies for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current technology and barriers to implementation: Final Report to the British Columbia Innovation Council. Seed Science. Jan.,14, 2009. http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0901_Seed_Science_Microalgae_technologies_and_processes_for_biofuelsbioenergy_production_in_British_Columbia.pdf.
20. **Theoretical** maximum algal oil production / K.M. Weyer, D.R. Bush, A. Darzins, B.D. Willson // Bioenergy Res. 2010. № 3. P. 204–213.
21. **Falkowski P.-G., Dubinsky Z., Wyman K.** Growth-irradiance relationships in phytoplankton // Limnol. Ocean. 1985. № 30 (2). P. 311–321.
22. **Langdon C.** The significance of respiration in production measurements based on oxygen // ICES J. Mar. Sci. Symp. 1993. № 197. P. 69–78.
23. **Zhu X.-G., Long S.P., Ort D.R.** What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? // Current Opinion in Biotechnology. 2008. № 19. P. 153–159.
24. **Microalgal** triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances / Q. Hu, M. Sommerfield, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, A. Darzins // Plant J. 2008. № 54. P. 621–639.
25. **Экспериментальный** модуль фотобиореактора для двухстадийного культивирования микроводорослей – продуцентов липидов / Н.И. Чернова, Т.П. Коробкова, Н.В. Радомский, С.В. Киселева, С.И. Зайцев, О.Ю. Гайнанова // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сб. науч. тр. М.: МАКС Пресс, 2012. № 18. С. 396–407.