

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ, ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ *SPIRULINA PLATENSIS*

В.Ю. Трифонов

*При выращивании микроводоросли *Spirulina platensis* в искусственных замкнутых биологических системах низкое содержание углекислого газа ограничивает интенсивность фотосинтеза и рост биомассы. Дефицит CO_2 — более серьезная проблема, чем дефицит элементов минерального питания. Микроводоросли синтезируют из воды и углекислого газа 94 % массы сухого вещества, остальные 6 % получают из растворенных в воде веществ. При образовании 1 кг сухой биомассы поглощается около 1,83 кг CO_2 . Покрыть дефицит CO_2 можно за счет искусственных источников углекислого газа.*



Демонстрация автором технологии на конференции

Компания «Промбиотехника» занимается разработкой и производством бытовых и промышленных систем биологической регенерации воздуха. При создании опытных образцов обнаружилось, что при выращивании микроводорослей *Spirulina platensis* в искусственных замкнутых биологических системах остро стоит вопрос об обеспечении их углекислым газом для осуществления процесса фотосинтеза.

Низкое содержание углекислого газа является фактором, ограничивающим интенсивность процесса фотосинтеза и рост биомассы микроводорослей. Дефицит CO_2 является более серьезной проблемой, чем дефицит элементов минерального питания. Микроводоросли синтезируют из воды и углекислого газа 94% массы сухого вещества, остальные 6% микроводоросли получают из растворенных в воде элементов. При образовании 1 кг сухой биомассы поглощается около 1,83 кг CO_2 .

Обеспеченность биосистемы CO_2 играет очень важную роль в управлении процессом фотосинтеза и выращивания биомассы водорослей.

Покрыть дефицит CO_2 возможно только за счёт использования искусственных источников углекислого газа. При выборе альтернативного природным источником углекислого газа было предложено

использовать дымовые газы, образующиеся в процессе сгорания различных видов топлив. Привлекательным является то, что дымовые газы содержат в виде окислов азот, серу и другие элементы, которые в виде солей необходимы для нормальной жизнедеятельности микроводорослей.

При проведении исследований нами были использованы следующие источники дыма:

- печь с температурным режимом сгорания до 700–750 °С. Аналогичные режимы имеют место в большинстве печей, находящихся сегодня в эксплуатации на самых различных объектах.
- специальная высокотемпературная печь с режимом сгорания 1250–1280°С. Такие печи применяют для интенсивного сжигания мусора, а также для уничтожения особо опасных отходов.

В качестве топлива использовались природный газ, твёрдые бытовые отходы (древесина, пропитанная парафином бумага, промасленная ветошь, куски автомобильной резины, пластмасса), отработанное машинное масло.

Для обеспечения необходимого давления в дымоходах мы осуществляли сжигание топлива при принудительной подаче воздуха. Скорость дымовой струи в дымоходах

печи составляла более 1-3 м/с, что соответствует скоростям дымовой струи в зоне электрофилтра в дымовых трубах ТЭС.

Сжигая различные виды топлив при разных температурных режимах нами был установлен усреднённый химический состав дымового газа: 88% N₂, 11% CO₂, 1% O₂, который приняли за основу в моделировании системы.

В процессе исследований наблюдалось значительное изменение состава дымового газа, зависящее от вида сжигаемого топлива, режима работы печи, от конструкции горелки, от количества подаваемого в топку кислорода.

Содержание CO₂ в дымовом газе колебалось в диапазоне от 6 до 11%.

Водоросли выращивались в фотобиореакторах плоскостного типа 2-х модификаций.

При прямой подаче осушенного дымового газа, прошедшего сухую и мокрую очистку, фиксировалось попадание в воду фотобиореактора следующих продуктов сгорания:

- окиси углерода (CO),
- оксидов азота (NO, NO₂, N₂O),
- диоксида серы (SO₂),

Концентрация в дыме этих токсичных соединений в значительной степени зависит от состава сжигаемого топлива.

В условиях эксперимента при многократном разбавлении дымового газа воздухом было установлено, что ПДК токсичных компонентов может значительно превышать предельно допустимые концентрации. При неполном осушении дымового газа, обильно образующийся конденсат в подающих газопроводах приводит к образованию серной и азотной кислот и при попадании их в фотобиореактор провоцирует гибель микроводорослей. Использование дымового газа возможно только при обеспечении его полной очистки от токсичных примесей. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности микроводорослей

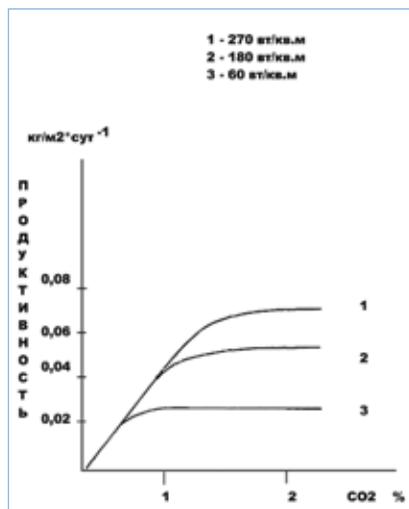


Рис. 1. Зависимость продуктивности *Spirulina platensis* от концентрации углекислого газа в суспензии в зависимости от условий освещенности

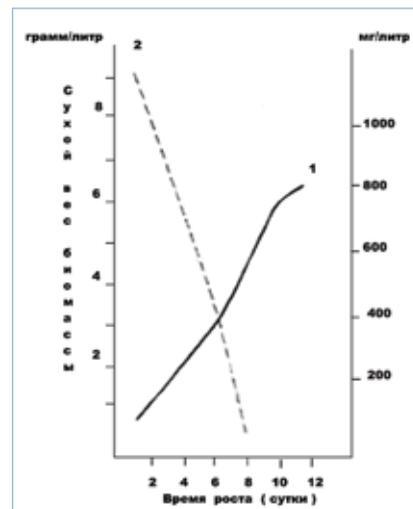


Рис. 2. Динамика роста *Spirulina platensis* при освещении источником света мощностью 80 Вт (1) и поглощение нитратов из питательной среды (2)



Рис. 3. Модель 1



Рис. 4. Модель 2

при использовании дымового газа нами была разработана и изготовлена установка, в которой дымовой газ проходил поэтапную обработку.

В установке осуществляются следующие процессы:

- сжигание топлива
- охлаждение дымовых газов.
- очистка дымовых газов от твердых нерастворимых дымовых частиц.

• в блоке фотокатализа осуществляется доокисление CO до CO₂ и NO до NO₂.

• в блоке подготовки питательной смеси производится нейтрализация кислотных составляющих дымовых газов и приготовление раствора солей для питательной среды,

необходимой для жизнедеятельности водорослей.

- выделение углекислоты
- осушение и очистка углекислоты
- сжижение углекислоты и её накопление в специальном резервуаре

Тепло, образующееся в процессе сжигания, частично используется для подогрева воды в фотобиореакторе.

При создании установки мы использовали как подачу очищенного и осушенного дымового газа, так и чистой углекислоты из резервуара.

В процессе исследований были разработаны технологические режимы дозированной подачи угле-

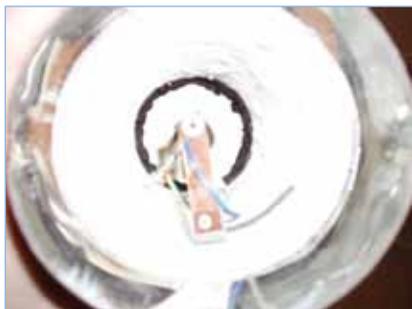


Рис. 5. Фотокаталитический фильтр



Рис. 6. Биомасса микроводоросли *Spirulina platensis*



Рис. 7. Биомасса спирулины на фильтрах



Рис. 8. 25 мг сухой биомассы *Spirulina platensis*

кислого газа в фотобиореактор, обеспечивающие рациональную утилизацию углекислоты. Также разработана система автоматического контроля за этим процессом. Система в автоматическом режиме контролирует и поддерживает степень освещённости, температуру, рН-воды, содержание CO_2 и кислорода в воде.

Привлекательным для внедрения предлагаемой технологии является возможность получения дымового газа в течение всего года. Основное требование к процессу сжигания – работать в постоянном режиме, обеспечивая полное сгорание топлива, и обеспечивать тепловой режим фотобиореакторов.

Система подачи дымового газа через систему газопроводов позволяет поддерживать определённый уровень CO_2 в воде в любое время года и любое время суток. При подаче углекислоты из резервуара, точность дозирования достаточно высока, чтобы считать процесс управляемым.

При подаче осушенного и прошедшего очистку дымового газа точность дозирования резко снижается так как содержание CO_2 в дыме недостаточно велико (максимально 11%, на практике 4-5%) для устойчивого поддержания рекомендуемой концентрации углекислого газа в воде и зависит от температурного режима сжигания. Резкие изменения концентрации CO_2 в воде вызывают у микроводорослей стресс, затормаживающий или полностью останавливающий процесс фотосинтеза.

Проектируя распылители с учётом формы фотобиореактора, можно подавать CO_2 по всему объёму фотобиореактора.

Разработанный технологический регламент подачи углекислого газа позволяет получить значительный прирост биомассы микроводорослей. При достаточной обеспеченности элементами минерального питания, подача углекислого газа в воду увеличивает прирост био-

массы микроводорослей до 80%, период удваивания биомассы сокращается в 1,5-2 раза.

В процессе экспериментов мы получали до 50 г сухой биомассы микроводорослей в пересчёте на один квадратный метр поверхности фотобиореактора в сутки, что в несколько раз выше, чем при обычном выращивании микроводорослей.

Увеличение содержания углекислого газа в воде снижает содержание нитратов в микроводорослях.

Использование углекислого газа можно рассматривать как эффективный инструмент управления процессом фотосинтеза. В процессе фотосинтеза выделяется большое количество кислорода. При проведении исследований выработаны режимы, при которых микроводоросли выделяли до 2 мл O_2 на 1 микрограмм биомассы. Выделяющийся кислород частично направлялся в печь для интенсификации процесса сжигания топлива. Остальной кислород выделяется в атмосферу помещения восстанавливая в ней содержание кислорода.

Экспериментальная установка по утилизации дымового газа находится в офисном помещении и в рабочем режиме никаких запахов не создаёт. Содержание кислорода в воздухе в помещении при работе установки повышается с 20,7% до 21,4%.

Таким образом, создана действующая модель искусственной замкнутой биологической системы с использованием биофильтров, содержащих фотосинтезирующие микроорганизмы, принципы функционирования которой могут быть использованы для утилизации дымовых газов, образующихся при сжигании различных видов топлив, твердых бытовых и особо опасных отходов.

Впервые действующая технология была представлена в апреле 2009 года на 6-й Международной конференции по проблемам от-

ходов, проводившейся в Харьковском политехническом университете (Украина, г. Харьков).

Разработан комплект технической документации на промышленный вариант такой установки.

Полная утилизация дымового газа возможна только при моделировании и использовании процессов, происходящих в естественных системах. То есть эффективная утилизация углекислого газа может полностью осуществляться только при использовании его живыми организмами для формирования биологической массы.

В промышленном варианте функцию фотобиореактора может выполнять бассейн, специально спроектированный для выращивания микроводорослей. Возможно также применение фотобиореакторов других конструкций.

Выращивание биологической массы микроводорослей является экономически выгодным. Сегодня один килограмм сухой биомассы микроводоросли *Spirulina platensis* на мировом рынке оценивается в 30-35 долларов США, потребность

в высококачественном растительном белке составляет сотни тысяч тонн.

Кроме того, в процессе жизнедеятельности микроводорослей на дне фотобиореактора образуется осадок, представляющий собой ценное органо-минеральное удобрение.

Это даёт возможность говорить об инвестиционной привлекательности применения предлагаемой технологии для компаний, занимающихся сбором и утилизацией мусора, а также для предприятий теплоэнергетики. Кроме доходов от основной деятельности компании могут получать значительный доход от производства ценной кормовой добавки, полу-

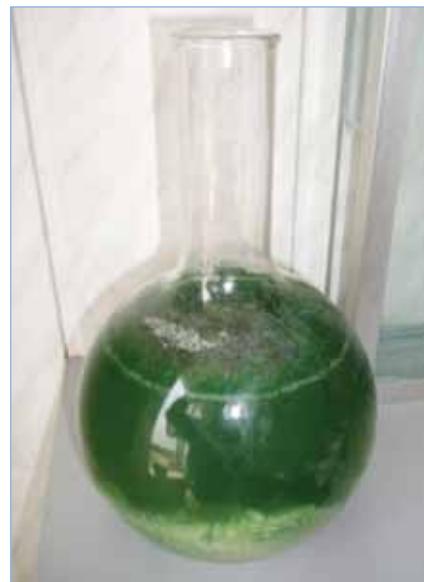


Рис. 9. Удобрение на дне

Таблица 1. Предполагаемые выбросы условного предприятия теплоэнергетики, работающего на газе

Наименование загрязняющих веществ	Количество тонн/год
Азота диоксид (NO ₂)	245
Азота оксид (NO)	40
Углерода оксид	115

Таблица 2. Примерный баланс основных химических элементов необходимых для получения 150 тонн сухой биомассы и 200 тонн органо-минерального удобрения

Наименование химического элемента	Потребность в элементе для получения биомассы тонн/год	Потребность в элементе для получения органо-минерального удобрения	Поступление элемента в составе дымовых газов тонн/год	Дефицит элемента тонн/год	Источник покрытия дефицита элементов
Углерод	77	70	48	99	Дополнительное использование выбросов CO ₂ и бикарбоната натрия
Азот	15	80	91	4	Использование минеральных солей или органических отходов
Сера	0,9	0,5	0,0000156	1,4	Использование выбросов газов, содержащих серу и не подвергавшихся процессу сероочистки, либо использование минеральных солей
Фосфор	2,25	5,0	—	7,25	Использование -минеральных солей

ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ

чения ценного удобрения биологического происхождения и получения технической углекислоты.

В качестве примера рассмотрим проект для тепловой электростанции. Возьмем условное предприятие теплоэнергетики, работающее на газе, со следующими предполагаемыми выбросами таблица 1.

Систему утилизации дымовых газов и производство спирулины предполагается располагать в непосредственной близости от предприятия.

Возможная производительность при таком количестве выбросов - 150 тонн сухой биомассы в год (18,7 г. сухой биомассы с 1 м² в сутки) и 200 тонн органоминерального удобрения в год.

Площадь комплекса 40000 м² (4 га), в том числе культиваторов (бассейнов) - 25000 м² (2,5 га).

Ориентировочная стоимость комплекса, включающая затра-

ты на проектирование, строительство, приобретение оборудования и начальные расходы по пуску и выводу производства на самофинансирование, ориентировочно составит 15 млн. \$ США.

Рыночная цена 1 кг сухой биомассы пищевой спирулины – 30 \$ США

Годовой доход от реализации биомассы – 4,5 млн. \$ США

Годовой доход от реализации органоминерального удобрения - 100 тыс \$ США.

Себестоимость производимой продукции в расчете на 1 кг сухой биомассы 10-15 \$ США.

Работа системы и культивирование микроводорослей осуществляется в течение всего года.

Предполагаемый срок окупаемости проекта 4-5 лет.

Проект обеспечивает полную утилизацию всех компонентов дымовых выбросов для подготов-

ки питательной среды, необходимой для содержания и разведения микроводорослей.

Примерный баланс основных химических элементов, необходимых для получения 150 тонн сухой биомассы и 200 тонн органоминерального удобрения представлен в Таблице 2.

Экологическим эффектом реализации проекта является отсутствие выбросов в атмосферу CO, NO_x, SO₂ и восстановление состава атмосферы в районе расположения объекта за счёт выделения большого количества молекулярного кислорода, выделяемого микроводорослями в результате процесса фотосинтеза.

Предлагаемая технология не только обеспечивает экологическую безопасность процесса сжигания различных видов топлива, но и является экологически полезной.