



Рисунок 4 – Влияние исходного значения pH на эффективность обесцвечивания красителя Black B 150

Определено, что повышение температуры с 26 °C до 52 °C приводит к снижению времени фотоокисления на 20 % при концентрации красителя 3,0 мл/г. Однако с увеличением исходной концентрации красителя это влияние становится не значительным.

Результаты проведенных экспериментов позволяют определить оптимальные технологические параметры УФ+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в зависимости от исходной концентрации красителя (табл. 2).

Таблица 2 – Оптимальные технологические параметры УФ+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

| Концентрация красителя, мг/л | Концентрация H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , мг/л | pH      | Время обработки, мин |
|------------------------------|---|---------|----------------------|
| 3,0                          | 60,0  | 6,0–8,0 | 5,0                  |
| 6,0                          | 80,0  | 6,0–8,0 | 7,0                  |
| 9,0                          | 80,0  | 6,0–8,0 | 15,0                 |

Таким образом, исследования фотохимической деструкции в присутствии H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> показывают, что скорость деструкции красителя Black B 150 в значительной степени зависит от начальных концентраций красителя и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, времени обработки, исходного значения pH. Исходная температура раствора не оказывает значительного влияния на процесс фотоокисления. На основании полученных результатов можно сделать вывод об эффективности применения фотоокисления для доочистки сточных вод от красителя Black B 150.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архипова, М. Б. Фотоокислительная очистка воды от фенолов / М. Б. Архипова, Л. Я. Терещенко, И. А. Мартынова, Ю. М. Архипов. // Журнал прикладной химии. – 1995. – Т. 69, № 9. – С. 1563–1568.
2. William, H. G. The chemistry of water treatment processes involving Ozone, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and ultraviolet radiation/ H. G. William, Joon-Wun Kang, H. C. Douglas. // Ozone scien. & engin. – 1987. – Vol. 9. – P. 335–352.
3. Кричевский, Г. Е. Фотохимические превращения красителей и светостабилизация окрашенных материалов / Г. Е. Кричевский. – М.: Химия, 1986. – 248 с.
4. Hai, F. Ibney. Hybrid treatment systems for dye wastewater / F. I. Hai, K. Yamamoto, K. Fukushi // Critical Rev. in Env. Scien. and Tech. – 2007. – 37 (4). – P. 315–377.
5. Белов, С. Г. Определение глубины деструкции органических соединений методом УФ-спектрометрии / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестник БГТУ. – 2013. – № 2. – С. 46–49.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ БИОГАЗА С ПОЛИГОНОВ ТКО

### ANALYSIS OF METHODS OF UTILIZATION OF BIOGAS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL

**B. M. Кононович, Н. А. Лысухо**

**V. Kononovich, N. Lysukha**

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,

г. Минск, Республика Беларусь

astreyko1990@mail.ru

Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

Во многих странах наиболее распространенным способом обезвреживания твердых коммунальных отходов (ТКО) остается их захоронение в геологической среде. В этих условиях отходы подвергаются интенсивному биохимическому разложению, которое вызывает генерацию биогаза. В данной статье проанализированы методы утилизации биогаза с полигонов ТКО и их характеристики.

In many countries, the most common method of municipal solid waste (MSW) decontamination is its disposal in the geological environment. Under these conditions, waste is subjected to intensive biochemical decomposition, which causes the generation of biogas. This article analyzes the methods of utilization of biogas from municipal solid waste landfills and its characteristics.

*Ключевые слова:* ТКО, полигоны ТКО, биогаз, газовые котлы, газовые турбины, когенерационные установки.

*Keywords:* MSW, MSW landfills, biogas, gas boilers, gas turbines, cogeneration plants.

Одним из распространенных в настоящее время способом обезвреживания ТКО является их захоронение. Подвергаясь захоронению, отходы разлагаются под действием интенсивных биохимических процессов, в результате которых в больших объемах образуются газовые смеси, объединенные термином «свалочный газ» или «биогаз».

Неконтролируемое выделение биогаза представляет серьезную угрозу для окружающей среды. Прежде всего, это связано с созданием пожароопасных условий на самих полигонах и в прилегающих сооружениях. Атмосферное электричество, неосторожное обращение с огнем часто вызывают возгорания полигонов, не оборудованных системами сбора и утилизации биогаза. Серьезную опасность представляют полигоны ТКО и свалки, расположенные в непосредственной близости от районов жилой застройки.

Миграция биогаза в грунте и прилегающих полостях представляет опасность как с технологической, так и с токсикологической точки зрения. Случаи отравлений, сопровождающиеся часто смертельными исходами, наблюдаются при техническом обслуживании инженерных коммуникаций, расположенных вблизи полигонов, не оборудованных системами сбора и утилизации биогаза.

Отмечено негативное влияние биогаза на местную фауну. Накопление и миграция биогаза в полостях и порах верхней части почвенного горизонта приводят к затруднению дыхания корневой системы растений, а затем и к полному подавлению их жизнедеятельности.

Неконтролируемый выброс биогаза является причиной атмосферного загрязнения прилегающих участков экосистемы высокотоксичными компонентами. Кроме того, метан и диоксид углерода, составляющие основу биогаза, являются парниковыми газами, значительно усиливающими эффект глобального изменения климата.

Для ликвидации и предупреждения негативных воздействий полигонов ТКО в большинстве развитых мировых государств проводятся целенаправленные мероприятия по снижению выбросов биогаза в атмосферу. Благодаря этому добыча и утилизация свалочного газа выделяется сегодня в отдельную самостоятельную отрасль мировой индустрии [1].

В мировой практике известны следующие способы утилизации биогаза:

- факельное сжигание;
- использование биогаза для производства тепловой энергии – котельные, сушильные установки, установки термического обезвреживания отходов;
- использование биогаза с целью получения электроэнергии – паровые турбины, газовые турбины, дизельные электростанции;
- использование биогаза с целью совместного получения электрической и тепловой энергии – когенерационные установки;
- использование биогаза в качестве топлива для транспорта;
- доведение содержания метана в биогазе до 94–95 % с последующим его использованием в газовых сетях общего назначения.

Факельное сжигание обеспечивает устранение неприятных запахов и снижает пожароопасность на территории полигона ТКО, при этом энергетический потенциал биогаза не используется в хозяйственных целях.

Биогаз может использоваться в качестве топлива для производства тепловой энергии. В Соединенных Штатах, Австралии и многих европейских странах (Швеция, Германия и Нидерланды) биогаз используется вместо такого обычного топлива, как природный газ, мазут или уголь, в течение более 30 лет. Технологии прямого применения доказали свою жизнеспособность и экологическую эффективность. В данном случае биогаз используется на месте или отправляется ближайшему конечному пользователю через специальный трубопровод, обычно изготовленный из полиэтилена высокой плотности или других материалов, таких как нержавеющая сталь. Длина трубопровода будет в первую очередь определять экономическую целесообразность проекта.

Биогаз можно сжигать в котлах или другом оборудовании, которое можно модифицировать для использования биогаза (сушилки, обогреватели, печи, риформеры, газовые чиллеры и др.) Использование биогаза хорошо подходит для операций, которые имеют постоянную и непрерывную потребность в топливе. Периодические процессы, которые имеют изменяющиеся потребности в энергии, не столь желательны, поскольку снижение спроса на биогаз приведет к избыточному его сжиганию.

Печи и сушилки могут использовать биогаз в качестве замены или дополнения к традиционным видам топлива в производстве цемента, кирпича и керамики, железа и стали, производстве изделий из дерева и др. Для небольших предприятий (таких как местные кирпичные или гончарные заводы) биогаз может удовлетворить все или большую часть потребностей в энергии. На заводах с большим потреблением энергии часто не достаточно количества биогаза, чтобы удовлетворить 100 % потребностей в топливе, поэтому биогаз часто используется в ка-

честве дополнительного топлива. В этих случаях биогаз обеспечивает экономию средств для отраслей с высокоэнергоемкими процессами, особенно для производителей, использующих импортные поставки топлива.

Также биогаз может использоваться в инфракрасных обогревателях. Инфракрасные обогреватели создают высоконапряженную энергию (тепло), которая безопасно поглощается полами и объектами в пространстве. Инфракрасные обогреватели эффективны для точечного обогрева, а также используются для обогрева больших площадей. Используются два вида инфракрасных обогревателей на биогазе: керамические (светлые) и трубчатые (темные или малоинтенсивные). Керамические инфракрасные обогреватели состоят из перфорированной керамической доски, покрытой алюминиевым отражателем и электроклапаном, который впитывает смесь газа и воздуха. Керамические инфракрасные обогреватели обычно работают при температурах от 800 °C до 1000 °C и имеют эффективность до 93 процентов. Трубчатые инфракрасные обогреватели состоят из газовой горелки, излучающей трубы и экрана и работают при температурах от 400 до 600 °C. Излучающая труба изготовлена из стали и титана и покрыта черной кремниевой эмульсией, которая способствует излучающей способности нагревателя. Инфракрасное отопление с использованием биогаза в качестве источника топлива успешно применяется на нескольких полигонах в Канаде, США и Украине. Это идеальное решение, когда на свалке или рядом с ней находится объект с потребностями в отоплении помещений, например, здание технического обслуживания полигона. В зависимости от местоположения, инфракрасный обогреватель может быть необходим только в зависимости от сезона, что может ограничить использование биогаза. Инфракрасные обогреватели требуют небольшого количества биогаза и относительно недороги и просты в установке и эксплуатации.

Выработка электроэнергии из биогаза составляет большую часть проектов по использованию биогаза по всему миру. Биогаз можно использовать в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания или турбинах внутреннего сгорания, приводящих в действие либо электрический, либо газовый генератор. Генерируемое электричество можно использовать для обеспечения потребностей на месте или, что более типично, для продажи в местную электросеть. Однако в условиях Беларуси эта возможность остается проблематичной из-за низких тарифов на электроэнергию и практических сложностей продажи электроэнергии в сеть малыми производителями.

Наиболее распространенной технологией утилизации биогаза для небольших и средних является использование двигателей внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания доступны в различных размерах с электрической мощностью в диапазоне от 0,2 МВт до 3,0 МВт на единицу. Двигатели внутреннего сгорания, которые используют биогаз в качестве топлива, являются коммерчески доступными и могут быть получены в виде модульных блоков или в составе полного параллельного генератора.

Более крупным примером технологии использования биогаза является газовая турбина. Газовые турбины, работающие на биогазе, аналогичны турбинам, работающим на природном газе. Большинство газовых турбин, работающих в настоящее время на свалках, имеют простой цикл. Газовые турбины, как правило, больше, чем двигатели внутреннего сгорания, и доступны в различных размерах от 1 МВт до более 10 МВт. Большинство проектов с использованием турбин в Соединенных Штатах имеют мощность в диапазоне от 3 до 5 МВт, что требует устойчивых потоков биогаза свыше 2000 м<sup>3</sup>/час. Газовые турбины требуют подачи топлива под высоким давлением [2].

Еще одним из перспективных направлений использования биогаза является совместное получение тепла и электроэнергии в когенерационных установках. Когенерационные системы вырабатывают электроэнергию и улавливают отходящее тепло для обеспечения тепловой энергией. Тепловая энергия, вырабатываемая в рамках когенерационных проектов может использоваться для отопления, охлаждения или технологического процесса на месте или передаваться по соседству промышленным или коммерческим пользователям. В настоящее время данная технология является самой перспективной для использования во всех цивилизованных странах мира, так как предусматривает использование биогаза в качестве топлива. На практике такие установки могут значительно сократить расходы на тепло и электроэнергию, поскольку можно получать дорогую энергию из дешевого топлива. Принцип действия когенерационной установки довольно простой. Газопоршневой двигатель, используя энергию при сгорании биогаза, вращает электрогенератор, вырабатывая электроэнергию, а оставшаяся теплота проходит через систему теплообменников. Отведенная теплота может использоваться в системе отопления, теплоснабжения и кондиционирования. Когенерационные установки можно использовать в условиях нерегулярного объема подаваемого биогаза или биогаза плохого качества. В этом случае возможно обогащение биогаза смешением с природным газом, или полный перевод работы на природный газ.

Когенерационные установки используются не только в качестве резервных, вспомогательных источников тепло и электроэнергии, но и как независимые мини-ТЭЦ. Их можно строить вблизи от потребителя, поэтому нет необходимости в создании дорогостоящих линий электропередачи и подстанций. Применение подобных установок дает возможность отапливать довольно крупные промышленные объекты или группы жилых или общественных зданий, и снабжать их электроэнергией. КПД когенерационной установки составляет до 90 % это обеспечивает значительное снижение затрат на топливно-энергетические ресурсы. Мощность единичной когенерационной системы варьируется от 24 кВт до 2000 кВт. Рекомендуемая минимальная мощность для хорошей экономической эффективности, от 120 кВт [3].

Для потребителя преимуществом использования электрической и тепловой энергии, полученной от когенерационной установки, является независимость от централизованных сетей энергоснабжения.

Во многих странах существует государственная поддержка применения когенерационных систем, работающих на газе. Связано это, в первую очередь, с экологией: когенерация позволяет сократить на 30–50 % эмиссию  $\text{CO}_2$  по сравнению с электростанциями, работающими на угле и на 15–20 % – по сравнению с раздельной генерацией электроэнергии и тепла.

В дополнение к широко используемым технологиям прямого использования и производства электричества, рассмотренным выше, существует несколько новых технологий. Эти технологии не используются в широком масштабе, но могут оказаться технически и экономически осуществимыми при определенных условиях. К таким технологиям можно отнести использование биогаза как топлива для автомобилей, использование биогаза как топлива для пиролизных печей, для заправки вращающихся барабанных сушилок или мусоросжигательных печей для локальных очистных сооружений сточных вод. Размещение полигонов ТКО, оснащенных комплексом по добыче биогаза, рядом с очистными сооружениями сточных может компенсировать энергетические затраты на очистку сточных вод.

Биогаз также можно использовать непосредственно для испарения фильтрата, что снижает затраты на обработку фильтрата и его транспортировку за счет испарения этой жидкости до более концентрированного и более легко утилизируемого объема сточных вод. Испарение фильтрата является хорошим вариантом для свалок, где удаление фильтрата недоступно или является дорогостоящим, или когда имеются большие объемы фильтрата, конкурирующие с ограниченным пространством на свалке. Однако некоторые побочные продукты испарения фильтрата (такие как концентрированные жидкости или соли) следует безопасно утилизировать или обрабатывать.

Существуют три категории систем выпаривания фильтрата: сушилки распылительного типа, устройства прямого впрыска и – наиболее часто используемые – испарительные емкости. Основными особенностями, отличающими эти различные системы испарения фильтрата, являются их методы передачи тепла для выщелачивания и обработки выхлопных паров. Большинство доступных коммерческих систем используют технологию испарения с прямым контактом, при которой тепло передается при непосредственном контакте между фильтратом и горячим газом сгорания [4].

Целесообразность применения того или иного способа утилизации биогаза зависит от конкретных условий хозяйственной деятельности на полигоне ТКО, наличия потребителей энергии, определяется наличием платежеспособного потребителя энергоносителей, полученных на основе использования биогаза и другими факторами. Так в Дании считается целесообразной организация сбора и использования биогаза уже с полигона ТКО, обслуживающего город с населением 40 и более тысяч человек [5]. При этом средняя площадь полигона – 5 га, средняя толщина слоя отходов – до 10 м, срок эксплуатации 15 – лет, вместимость полигона – примерно 125 тыс. т отходов. Анализ фактических данных по использованию биогаза полигонов ТКО в США, показал, что минимальный объем отходов на полигоне, где целесообразна реализация проектов по использованию биогаза для производства энергии – 30 тыс. т в год. В странах Западной Европы эффективной считается утилизация биогаза от полигонов, обслуживающих города с населением от 40 тыс. человек. По расчетам российских специалистов наиболее рентабельными для установки систем сбора и использования биогаза являются полигоны областных центров и города с населением от 100 тыс. чел. Утилизация биогаза с населением 100 тыс. человек может обеспечить потребности в электроэнергии и тепле жилого поселка с населением 1 тыс. человек.

В большинстве развитых стран этот процесс стимулируется государством с помощью специальных законов. Во многих странах ЕС и США существуют законы, обязывающие покупать альтернативную энергию. Нормативно определена стоимость такого вида энергии, которая, как правило, в 2–2,5 раза выше стоимости энергии, полученной из традиционных видов топлива. В России, Украине, Беларуси подобная нормативная правовая база отсутствует. Данное обстоятельство сдерживает широкое распространение использования биогаза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Садчиков, А. В. Дегазация полигонов твердых коммунальных отходов / А. В. Садчиков // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 2. – С. 82–86.
2. International Best Practices Guide for Landfill Gas Projects / U. S. Environmental Protection Agency. – 2012.
3. Болдин, С. В. Энергосберегающие технологии использования биогаза в когенерационных установках / С. В. Болдин, Н. Т. Пузиков // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2011. – Вып. 2. – С. 43–44.
4. Эдер, Б. Биогазовые установки: практ. пособие / Б. Эдер, Х. Шульц: Ökobuch Verlag u. Versand. – 1996. – 168 с.
5. Трофимов, С. П. Об использовании твердых бытовых отходов / С. П. Трофимов, Д. М. Чижов // Энергетическое строительство. – 1994. – № 10. – С. 24 – 28.