Моделирование процессов сбраживания органических отходов в условиях, приближенных к эксплуатации полигонов ТКО

Афонин Константин Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, afoninkv@tyuiu.ru,

Жилина Татьяна Семеновна
кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, zhilinats@tyuiu.ru,

Загорская Алла Александровна
старший преподаватель, кафедра техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, zagorskayaaa@tyuiu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования по утилизации смешанных органических отходов, включающих пищевые компоненты твердых коммунальных отходов и продукты очистки бытовых сточных вод (отбросы решеток, сырой осадок, активный ил), методом анаэробного сбраживания. Приведены данные по изменению температуры, pH и объема субстрата в лабораторных условиях. На примере 30-суточного эксперимента выполнена оценка потенциала биодеградации и условий запуска метаногенеза.
С учетом выявленных лимитирующих факторов обоснованы необходимые условия для эффективного метаногенеза: внесение инокулята (20–30% объема), поддержание pH 6,8–7,5 и температуры 35–37 °C, герметизация реактора. Сделан вывод, что исходная конфигурация эксперимента не обеспечивает энергетически значимого выхода биогаза, однако предложенные корректирующие мероприятия позволяют достичь показателей, соответствующих литературным данным (300–500 мл CH_4/г VS). Обоснованы перспективы совместного сбраживания пищевых отходов и осадка сточных вод данным способом.
Ключевые слова: анаэробное сбраживание, пищевые отходы, осадок сточных вод, активный ил, метаногенез, биогаз.

Введение

Отходы селитебных территорий всё ещё самая проблемная часть отходов, плохо возвращаемая в оборот. Несмотря на развитие технологий самыми часто используемыми вариантами утилизации ТКО во всем мире является уничтожение или размещение на полигонах (рис.1) [1]

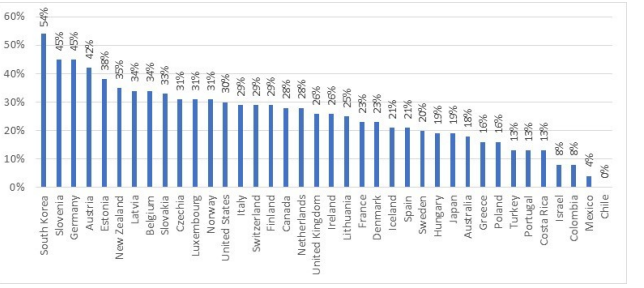


Рисунок-1 Процент вовлечения ТКО в процессы утилизации

Мировая статистика показывает: высокий рециклинг, более 40%, в Корее, Словении, Германии и Австрии означает, что на полигонах ТКО оказывается меньше половины массы отходов. При среднем уровне (20–40%) в США, Эстонии, Бельгии и Франции остаток, отправляемый на захоронение, варьируется от 60% до 80% от общего объема. В России процент утилизируемых коммунальных отходов находится на уровне с развивающимся странами. Так по данным [2] за 2025 год региональные экологические операторы собрали более 46 миллионов тонн отходов, из которых 54,9% были отсортированы, 81,3% размещены на полигонах, 2,4% отходов было уничтожено и около 10% ТКО было утилизировано (рис. 2). Таким образом, в России полигоны являются базовым элементом системы обращения с отходами, что приводит к потере вторичных ресурсов, отчуждению значительных территорий и долгосрочным экологическим рискам, связанным с загрязнением воздуха, грунтовых вод и деградацией почв и растительности.

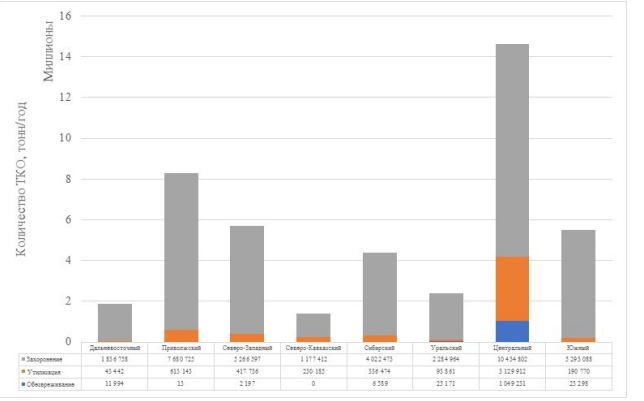


Рисунок 2 – Операции по обращению с ТКО на территории РФ

Тюменская область не является исключением из общероссийской практики: за 2025 год на объекты размещения было направлено 519 742 тонны ТКО, тогда как утилизировано лишь 22 606 тонн. При этом регион достиг впечатляющего результата — сортируется 100% ТКО, что уникально для России. Однако на этом фоне остро выделяется другая цифра: доля отходов, отправляемых на захоронение, составляет 94,8%. Данная стратегия управления отходами приводит к экспоненциальному росту числа несанкционированных свалок для твердых коммунальных отходов и переполненности уже существующих объектов.

Эксплуатация существующих полигонов ТКО сопряжена с рядом серьёзных экологических проблем, которые оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду. В качестве конкретного примера можно привести полигон, расположенный на 9-м километре Велижанского тракта, который неоднократно становился объектом административных разбирательств. В ходе проверки, проведённой Росприроднадзором, были выявлены факты загрязнения почвы тяжёлыми металлами и другими высокотоксичными веществами. Оценка ущерба, причинённого экосистеме, составила 1,2 млн рублей, что привело к наложению административного штрафа на оператора полигона. Ситуация усугубляется наличием нелегального размещения отходов, последствия таких инцидентов оцениваются в 537 млн рублей, что свидетельствует о масштабности экологических рисков, связанных с нарушениями условий эксплуатации объектов размещения отходов. Таким образом, внедрение технологий, уменьшающих нагрузку на

полигоны ТКО представляет собой не просто экологическую инициативу, а стратегически значимую задачу, направленную на минимизацию доказанного экологического ущерба и достижения целевых показателей национального проекта «Экология».

В составе ТКО Тюменской области, как и в целом по России, органические отходы составляют от 30% до 50%. Органическая фракция ТКО представляет из себя ценный вторичный ресурс для производства биометана или компоста. Генерация метана при грамотном управлении превращает полигон из источника постоянной угрозы в источник энергии и объект с прогнозируемым сроком «экологической реабилитации». Это требует перехода к активным технологиям получения биометана, что особенно актуально для регионов с высокой долей захоронения, таких как Тюменская область.

Мировая практика генерации метана на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) демонстрирует высокую эффективность, способствуя снижению вредных выбросов и производству возобновляемой энергии. Примеры успешного применения данной технологии включают установку в Монреале, мощность которой составляет 4,8 МВт. Эта установка обеспечивает электроэнергией около 2000 жилых домов и обогревает штаб-квартиру всемирно известного Cirque du Soleil. В Греции аналогичный проект мощностью 3,52 МВт был удостоен престижной награды Energy Globe Award в 2023 году, что подчеркивает его значимость в контексте устойчивого развития и энергоэффективности.

Несмотря на очевидные преимущества технологии метаногенеза, применяемой на полигонах твёрдых коммунальных отходов (ТКО), её интеграция в практику остаётся неравномерной. Потенциал данного инновационного подхода к утилизации отходов не используется в полной мере, что указывает на необходимость проведения дополнительных научных исследований и оптимизации технологических процессов.

Если раньше основной проблемой было низкое содержание сбраживаемых компонентов, то сейчас, с внедрением централизованной сортировки или раздельным сбором отходов, фокус сместился в сторону увеличения выхода метана за счет предварительной обработки и комбинирования разных типов сырья [3]

Доказано, что на выход биогаза в первую очередь влияет сообщество бактерий и архей. Авторы, Wong и соавторы [4] акцентируют внимание на связи физико-химических свойств отходов с активностью конкретных штаммов микроорганизмов. Несмотря на высокий потенциал ТКО по генерации биогаза, сложность состава ТКО (пластик, стекло, влажность) создает серьезные ограничения для промышленного масштаба [5]. Также современные исследования подчеркивают важность совместного сбраживания различных групп отходов селитебных территорий для интенсификации метаногенеза [6]

Технология совместного сбраживания ТКО и осадков сточных вод в России находится на стадии активной научной проработки и технологического проектирования, но до широкого промышленного применения на объектах еще далеко [7]. Поскольку многообразие компонентного состава ТКО представляет собой значительную проблему и технологии, эффективные для одного типа отходов, могут оказаться непригодными для другого без внедрения сложных систем предварительной подготовки. В каждом конкретном случае требуется настройка системы по технологическим параметрам в зависимости от физико-химических характеристик субстрата.

Самым экономичным, не требующим значительных капитальных затрат, вариантом получения биогаза является способ генерации метана непосредственно в теле полигона, так как не требует строительства дорогостоящих герметичных реакторов, систем перемешивания и подогрева субстрата. По сути, полигон сам выступает в роли огромного готового метантенка, а капитальные затраты сводятся в основном к бурению скважин и монтажу газосборной сети без необходимости покупки специализированного оборудования для подготовки сырья. Однако стоит учитывать, что при этом процесс идет медленнее, а контроль состава газа затруднен по сравнению с промышленными установками.

Целью данного научного исследования стало изучение условий совместного сбраживания органической части ТКО и отходов очистки коммунальных сточных вод Тюменского ГОСК в условиях приближенных к условиям размещения отходов на полигоне.

Материалы и методы исследования

Согласно [11] сбраживаемая часть ТКО составляет около 21%, что для 2024 года соответствует 106108,09 тонн в год. Масса смеси активного ила и сырого осадка после обезвоживания на городских очистных сооружениях канализации в городе Тюмени по приблизительным оценкам составляет 102565 т в год. Потенциал такого сырья для производства метана оценивается от 58 до 99 тысяч м3 метана в год [12].

Для оценки потенциала анаэробного сбраживания смешанных отходов, включающих отсортированные пищевые компоненты твердых коммунальных отходов (ТКО) и продукты очистки бытовых сточных вод, был проведен натурный опыт в лабораторных условиях ООО «Тюмень-Водоканал». В рамках данного исследования были проанализированы режимы работы экспериментальной установки, представляющей из себя открытый резервуар с теплоизоляцией, позволяющий контролировать поступление кислорода и температурный режим (рисунок 3)

В основу данного эксперимента было положено изучение динамики биодеградации смеси органических материалов, а также оценка влияния теплоизоляции на скорость разложения исходного субстрата.

Результаты исследования будут служить основой для дальнейшей оптимизации работы полигонов ТКО, а также для разработки мероприятий, направленных на минимизацию экологического воздействия и повышение ресурсоэффективности процессов очистки сточных вод.

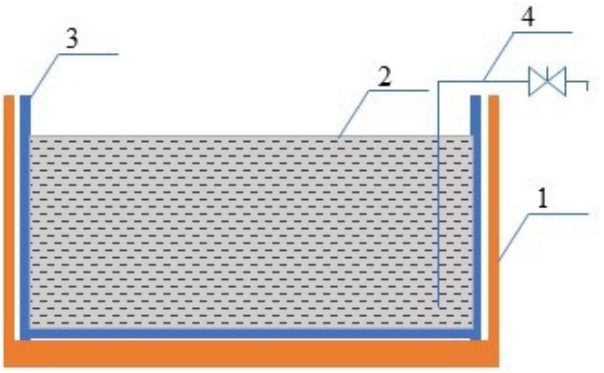


Рисунок 3– Условия проведения эксперимента

1 –теплоизоляция: 2 – субстрат; 3 – загрузочная ёмкость; 4 – газоотборник;

Исходные компоненты для ферментации и их пропорции представлены в таблице 2. Наблюдения за процессами сбраживания велись в течение 30 суток в условиях лаборатории при температуре окружающей среды 270 С.

Таблица 2
Ингредиентный состав субстрата

Ингредиент	Пищевые отходы	Отбросы решеток	Сырой осадок отстойников	Активный ил
Масса, граммы	354	142	4	4
Масса, %	70,2	28,2	0,8	0,8
Влажность, %	60,25	54,38	94,3	99,15

С помощью микроскопа Levenhuk 320 PLUS был проведен микробиологический анализ активного ила. Биоценоз в основном состоит из раковинных амеб (Arcella) и голых (Amoeba proteus). Одиночные прикрепленные инфузории (Vorticella sp.) в большем количестве, чем колониальные (Epistylis sp., Opercularia sp.). Присутствуют свободноплавающие брюхоресничные инфузории (Litonotus sp., Aspidisca costata,). Единично встречаются сосущие инфузории (Tocophria mollis), черви (Nematoda) и коловратки (Rotaria rotatoria, Lecane) (рис. 4)



Рисунок 4 – Микробиоценоз активного ила

При проведении опыта контролировались такие параметры как pH [7], масса и влажность субстрата [8], температура [9]. Также была произведена оценка образующегося метана многоканальным газоанализатором Dräger X-am [10].

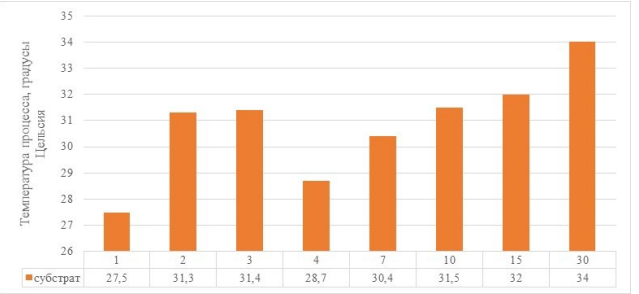


Рисунок 5 – Изменение температуры в процессе ферментации

По данным на рисунке 5 можно отметить, что проба продемонстрировала саморазогрев до 34 °С, что говорит об активных биохимических процессах (экзотермическая реакция гидролиза и ацидогенеза).

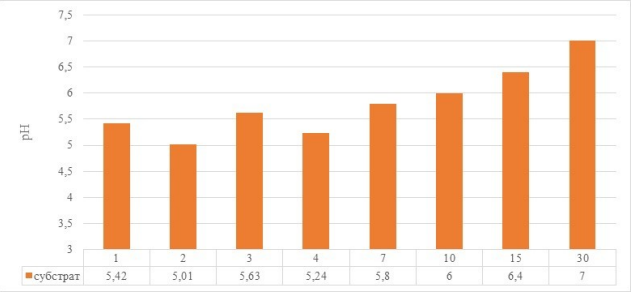


Рисунок 6 – Характер изменения кислотности среды

Повышение pH в пробе объясняется поступлением кислорода, поскольку система открыта, который способствует развитию аэробных и факультативных бактерий, частично утилизирующих летучие жирные кислоты или образованием аммиака из азотсодержащих соединений (осадок), который подщелачивает среду.

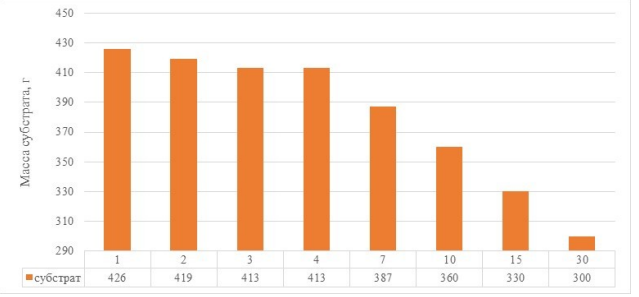


Рисунок 7 – Деградация массы субстрата

В анализируемой пробе наблюдается снижение массы субстрата, что связано с высокой метаболической активностью микроорганизмов. Данный процесс сопровождается гидролизом и растворением органических соединений, а также образованием газообразных продуктов, таких как диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4). Следует отметить, что эти изменения могут быть частично обусловлены методикой отбора проб и последующим испарением.

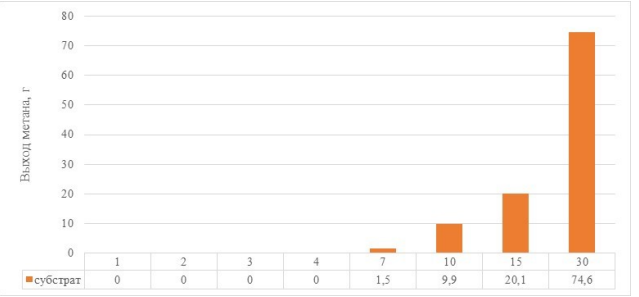


Рисунок 8 – Потенциал метанообразования

На начальном этапе сбраживания ТКО, в течение первых четырёх суток, выделение метана полностью отсутствует, что соответствует лаг-фазе, когда микроорганизмы адаптируются к субстрату, а органическое вещество подвергается гидролизу и ферментативному расщеплению. Начиная с 7-го дня фиксируется резкий рост метаногенеза: потенциал образования метана увеличивается с 1,5 до 20,1 мл/г к 15-м суткам, что свидетельствует о переходе процесса в активную фазу с экспоненциальным накоплением биогаза. К 30-му дню выход метана достигает максимального за период наблюдения значения — 74,6 мл/г, что говорит о высокой биоразлагаемости органической фракции твёрдых коммунальных отходов. Однако к концу наблюдений выход газа не стабилизировался, поскольку кривая не вышла на плато. В целом динамика соответствует классической S-образной модели микробного разложения с выраженным ускорением после 4-х суток и устойчивым ростом на всём протяжении эксперимента.

В открытой системе наличие кислорода индуцировало развитие аэробной и факультативно-анаэробной микробиоты. Кислород способствовал частичной деградации летучих жирных кислот, снижая тем самым уровень кислотности, а также окислению аммонийного азота до нитритов и нитратов. Наблюдаемое повышение pH объясняется сохранением части аммиака в форме NH_3, что привело к подщелачиванию среды. Кроме того, аэробное дыхание сопровождалось экзотермическим эффектом, обеспечившим саморазогрев субстрата до 30,4 °С.

Присутствие кислорода в открытой системе исключает возможность протекания чистого метаногенеза вследствие его летального либо супрессивного воздействия на метаногенные археи. Максимально достижимый режим представляет собой гибридный (аэробно-анаэробный) процесс, при котором продукция биогаза характеризуется доминированием диоксида углерода и незначительным количеством метана.

Заключение

В результате проведения натурного эксперимента по оценке потенциала анаэробного сбраживания смешанных отходов, включающих пищевые компоненты твердых коммунальных отходов (ТКО) и продукты очистки бытовых сточных вод (отбросы решеток, сырой осадок, активный ил), были проанализированы условия генерации метана в течение 30 суток.

Установлено, что в исследуемом режиме не было достигнуто устойчивого метаногенеза. Основными лимитирующими факторами явились:

Недостаточный температурный режим (27,0–34,0 °С), не достигающий мезофильного оптимума (35–37 °С), что дополнительно ингибировало развитие метаногенной микрофлоры.

Недостаточное количество инокулята (всего 4 г активного ила на 504 г субстрата), что не позволило запустить метаногенез до наступления, ингибирующего закисления.

Для достижения устойчивого метаногенеза необходима корректировка условий ферментации отходов, включающая:

введение активного инокулята в количестве не менее 20–30% от объема субстрата;

поддержание pH в диапазоне 6,8–7,5 (например, добавлением бикарбоната натрия);

обеспечение температуры 35–37 °С с помощью внешнего нагрева или модернизации теплоизоляции;

использование закрытой системы без доступа кислорода;

периодическое перемешивание для предотвращения локального закисления.

возможное разделение процесса сбраживания на две стадии, проводимых в разных ректорах (сначала гидролиз/ацидогенез, затем ацетогенез/метаногенез)

На основании предварительных исследований установлено, что в условиях, приближенных к типичному размещению отходов на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) достижение устойчивого метаногенеза не представляется возможным. Совместное анаэробное сбраживание органической фракции твердых коммунальных отходов (ТКО) и осадков бытовых сточных вод требует строго регламентированных условий и тщательной предварительной обработки субстрата, что осуществимо только путем ферментации смеси отходов в реакторе.

Литература

Глобальный индекс отходов 2025. - https://sensoneo.com/global-waste-index/#.

Росприроднадзор Федеральная служба по надзору в сфере природопользования Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/

Optimization of biogas production using municipal solid waste in sub Saharan Africa: a systematic review NSEKELA, Emmanuel, DEFERME, Wim , Chacha, Nyangi, 2026 Discover sustainability, 7 (1) (Art N° 337) https://documentserver.uhasselt.be/handle/1942/48762

Yee Ching Wong1*, Sharizatul Akma Mohd Sari1, Norfatihah Mohd Adenam1, Hasan Abdellatif Hasan2* Optimizing Biogas Production from Municipal Solid Waste: A Comprehensive Analysis of Microbial Communities and Substrate Characteristics in Anaerobic Digestion Systems International Journal of Electroactive Materials. 13 (2025) 52-57

Sarker, T.R., Ethen, D.Z., Asha, H.H. et al. Transformation of municipal solid waste to biofuel and bio-chemicals – a review. Int. J. Environ. Sci. Technol. 22, 3811–3832 (2025). https://doi.org/10.1007/s13762-024-05975-0

Ayyadurai Saravanakumar, M.R. Sudha, Wei-Hsin Chen, Vijayakumar Pradeshwaran, Veeramuthu Ashokkumar, Anurita Selvarajoo, Biomethane production as a green energy source from anaerobic digestion of municipal solid

waste: A state-of-the-art review, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, Volume 53, 2023, 102866, ISSN 1878-8181, https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102866

Анаэробная обработка высокоуплотненных осадков сточных вод в термофильных условиях / Ю. В. Литти, Д. А. Ковалев, А. А. Ковалев [и др.]. — текст : непосредственный // «Вода Magazine. — 2015. — № 6(94).

ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений pH в водах потенциометрическим методом.

ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.27-02 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания влаги в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом

ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03 Методические рекомендации отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления

ГОСТ Р 52350.29-1-2010 «Взрывоопасные среды. Часть 29-1. Газоанализаторы. Общие технические требования и методы испытаний газоанализаторов горючих газов»

Территориальная схема обращения с отходами, https://admtyumen.ru/ogv_ru/about/ecology/production_wastes/territorial_scheme.htm

Young-Ju Song , Kyung-Su Oh, Beom Lee, Dae-Won Pak, Ji-Hwan Cha and Jun-Gyu Park Characteristics of Biogas Production from Organic Wastes Mixed at Optimal Ratios in an Anaerobic Co-Digestion Reactor Energies 2021, 14, 6812. https://doi.org/10.3390/en14206812

Modeling Organic Waste Digestion Processes under Conditions Similar to those of MSW Landfill Operation

Afonin K.V., Zhilina T.S., Zagorskaya A.A.
Tyumen Industrial University

JEL classification: L61, L74, R53

This paper presents the results of an experimental study on the utilization of mixed organic waste, including food components of municipal solid waste and wastewater treatment products (screen waste, raw sludge, activated sludge), using anaerobic digestion. Data on changes in temperature, pH, and substrate volume under laboratory conditions are provided. Using a 30-day experiment as an example, the biodegradation potential and conditions for initiating methanogenesis were assessed.

Taking into account the identified limiting factors, the necessary conditions for effective methanogenesis were substantiated: inoculum addition (20–30% of the volume), maintaining a pH of 6.8–7.5 and a temperature of 35–37°C, and reactor sealing. It was concluded that the initial experimental configuration did not provide an energetically significant biogas yield; however, the proposed corrective measures made it possible to achieve values consistent with literature data (300–500 mL CH_4/g VS). The prospects for co-fermentation of food waste and sewage sludge using this method are substantiated.

Keywords: anaerobic digestion, food waste, sewage sludge, activated sludge, methanogenesis, biogas.

References

1. Global Waste Index 2025. - https://sensoneo.com/global-waste-index/#.
2. Rosprirodnadzor Federal Service for Supervision of Natural Resource Usage Information on the formation, processing, utilization, neutralization, and placement of production and consumption waste https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/
3. Optimization of biogas production using municipal solid waste in sub-Saharan Africa: a systematic review NSEKELA, Emmanuel, DEFERME, Wim , Chacha, Nyangi, 2026 Discover sustainability, 7 (1) (Article N° 337) https://documentserver.uhasselt.be/handle/1942/48762
4. Yee Ching Wong1*, Sharizatul Akma Mohd Sari1, Norfatihah Mohd Adenam1, Hasan Abdellatif Hasan2* Optimizing Biogas Production from Municipal Solid Waste: A Comprehensive Analysis of Microbial Communities and Substrate Characteristics in Anaerobic Digestion Systems International Journal of Electroactive Materials. 13 (2025) 52-57
5. Sarker, T.R., Ethen, D.Z., Asha, H.H. et al. Transformation of municipal solid waste to biofuel and bio-chemicals – a review. Int. J. Environ. Sci. Technol. 22, 3811–3832 (2025). https://doi.org/10.1007/s13762-024-05975-0
6. Ayyadurai Saravanakumar, M.R. Sudha, Wei-Hsin Chen, Vijayakumar Pradeshwaran, Veeramuthu Ashokkumar, Anurita Selvarajoo, Biomethane production as a green energy source from anaerobic digestion of municipal solid waste: A state-of-the-art review, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, Volume 53, 2023, 102866, ISSN 1878-8181, https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102866
7. Anaerobic treatment of highly compacted sewage sludge under thermophilic conditions / Yu. V. Litti, D. A. Kovalev, A. A. Kovalev [et al.]. - text: direct // "Water Magazine. - 2015. - No. 6 (94).
8. PND F 14.1:2:3:4.121-97 Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring pH in water using the potentiometric method.
9. PND F 16.2.2:2.3:3.27-02 Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring moisture content in solid and liquid industrial and consumer waste, sediments, sludge, activated sludge, and bottom sediments using the gravimetric method.
10. PND F 12.1:2:2.2:2.3.2-03 Methodological recommendations for sampling soils, grounds, bottom sediments, sludge, sewage sludge, industrial wastewater sludge, and industrial and consumer waste.
11. GOST R 52350.29-1-2010 "Explosive atmospheres. Part 29-1. Gas analyzers. General technical requirements and test methods for combustible gas analyzers
12. Territorial waste management scheme, https://admtyumen.ru/ogv_ru/about/ecology/production_wastes/territorial_scheme.htm
13. Young-Ju Song, Kyung-Su Oh, Beom Lee, Dae-Won Pak, Ji-Hwan Cha, and Jun-Gyu Park. Characteristics of Biogas Production from Organic Wastes Mixed at Optimal Ratios in an Anaerobic Co-Digestion Reactor. Energies 2021, 14, 6812. https://doi.org/10.3390/en14206812