

11. Пропольский, Д. Э. Модификация фильтрующих загрузок для очистки подземных вод / Д. Э. Пропольский // Вода. Газ. Тепло – 2020: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белорус. нац. техн. ун-т, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 октября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2020. – С. 139–141.

12. Пропольский, Д. Э. Методы модификации фильтрующих материалов загрузок для целей водоподготовки подземных вод / Д. Э. Пропольский // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы Шестой республ. науч.-техн. конф. молодых ученых, посвящ. памяти члена-корреспондента НАН Беларуси С. С. Песецкого, Гомель, 9–11 нояб. 2020 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 118–120.

13. Пропольский, Д. Э. Применение полифункциональных модифицированных материалов для комплексной очистки подземных вод / Д. Э. Пропольский, С. В. Красковский // Технологія – 2020: матеріали 23 міжнар. наук.-техн. конф., Сєвєродонєцьк, 24–25 квїт. 2020 р. / Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля; редкол.: Є. І. Овчарєнко, О. В. Суворїн, В. І. Соколов. – Сєвєродонєцьк, 2020. – С. 95.

УДК 628.356

**Особенности учета и прогнозирования образования биогаза в технологии анаэробной очистки сточных вод в системах с гранулированным активным илом**

Рымовская М. В., Гребенчикова И. А.

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В Республике Беларусь эксплуатируется несколько установок для анаэробной очистки сточных вод в системах с гранулированным илом. В работе рассмотрены системы учета биогаза на этих объектах, сопоставлены фактические и полученные расчетным путем объемные расходы биогаза. Показано, что выявленные расхождения в области низких и высоких нагрузок по органическим веществам коррелируют с активностью ферментных систем микроорганизмов в системе биореактора.*

Биологические методы удаления загрязнений из сточных вод общепризнанно считаются наиболее экономически эффективными и экологически при-

емлемыми. Традиционно используемая технология аэробной очистки в сооружениях с флокулированным, иммобилизованным на носителе и гранулированным илом совершенствуется параллельно с группой анаэробных технологий очистки, при этом технологические и технические решения сходны.

Система знаний о конструкциях биореакторов для анаэробной очистки с гранулированным илом, микробиологии метаногенного биоценоза и биохимических процессах, протекающих в этом биоценозе, а также общие рекомендации по ведению и контролю процесса доступна для изучения [1–3]. Мировой опыт используется при эксплуатации действующих в Республике Беларусь установок [4; 5], однако сам технологический процесс в нашей стране пока считается нестабильным и сложным для контроля процессом.

Несомненным преимуществом анаэробной очистки является образование биогаза, который используется в качестве энергоносителя, поскольку 55–80 % его составляющих – метан, остальное – углекислый газ (15–50 %), содержание сероводорода, азота, капельной и парообразной влаги – до 5 %. В зависимости от области использования биогаза может быть организовано удаление практически всех примесей метана, чаще всего (для энергоснабжения котельных агрегатов, сушильных установок, газовых плит и двигателей) необходимы осушка и удаление сероводорода [6].

Для учета биогаза требуется использование комплекта оборудования для установления количества (объемного расхода) и качества (давления, влажности, температуры, компонентного состава) газа [7]. На эксплуатируемых в РБ установках с гранулированным активным илом для анаэробной очистки сточной воды система учета биогаза, используемая по месту его образования, включает измерение объемного расхода газа, косвенно учитывают его температуру и давление, периодически на отдельных объектах (производственный цех № 6 ОАО «Минск Кристалл») используется определение доли метана в биогазе.

Для прогнозирования количества биогаза используются зависимости, отражающие прямо пропорциональную связь между количеством утилизированных в биореакторе органических загрязнителей и учитывающие качественный состав этих загрязнителей. Количество органических загрязнителей суммарно обычно учитывается по общему органическому углероду, химическому потреблению кислорода (ХПК) и/или летучим жирным кислотам (ЛЖК), качественный состав их определяется профилем производства и используемой технологией [1].

На локальных очистных сооружениях ОАО «Туровский молочный комбинат» в системе технико-химического контроля работы установки достаточно полно организовано проведение постоянного учета фактически образующегося и прогнозирования количества биогаза, суммарного количества органических загрязнителей по ХПК и ЛЖК в сточной и биологически очищенной воде. Сопоставление объемных расходов учитываемого и прогнозируемого количеств

биогаза показало, что при общем подобии расхождений все же значительны. Для анализа этих расхождений построили график зависимости разницы между фактическим и расчетным количествами биогаза от количества утилизированных органических загрязнителей, оцененных по ХПК (рис.).

Между нагрузкой на биореактор по органическим веществам и скоростью их утилизации для этой системы существует тесная корреляция ( $r = 0,97$ ). Поэтому можно сделать вывод, что формула для прогнозирования количества биогаза справедлива в области средних нагрузок по органическим веществам и потому может успешно использоваться в период стабильной работы. Для объяснения большой разницы в области низких и высоких нагрузок нужно обратиться к активности биохимических процессов.



Рис. Зависимость разности предсказанного и фактического расходов биогаза от утилизированных в биореакторе органических загрязнений

Ранее нами проводилась оценка биохимической активности микроорганизмов из модельных, эксплуатирующихся при разных условиях анаэробных биореакторов [8]. Для этого высевали жидкую фазу, отбираемую из биореакторов, в объем питательных сред с лактозой (оценивалось протекание стадий гидролиза и кислотогенеза) и ацетатом (устанавливали протекание стадии метаногенеза), результат оценивали только качественно – по наличию газообразных метаболитов. Было показано, что при низких нагрузках активно протекают стадии гидролиза и кислотогенеза; увеличение нагрузки до значений среднего и высокого значений приводит к снижению биохимической активности этих процессов при слабокислом рН, тогда как при рН в районе 7,0 ферменты этих систем остаются активными. Обычно бактерии-броидильщики предпочитают рН на уровне 5,5–6,0, и отмеченная в

эксперименте их активности при нейтральном значении pH может быть объяснена только отсутствием субстратного ингибирования: быстрым потреблением органических кислот, образующихся при брожении. Активность метаногенов была отмечена при средних и высоких нагрузках, что подтверждает сделанный выше вывод.

Таким образом, в области низких нагрузок фактический объемный расход биогаза меньше, чем рассчитанный, что можно связать с очень слабой активностью протекания метаногенной стадии, и потому – ингибированием ферментных систем кислотогенных бактерий продуктами реакции – органическими кислотами. В области высоких нагрузок на анаэробный активный ил кислотогенная стадия не лимитируется, поскольку метаногенные бактерии активно потребляют органические кислоты. Объем газообразных продуктов метаногенной стадии (в основном – метана) больше объема углекислого газа, образующегося в числе продуктов кислото- и ацетогенеза (органических кислот и спиртов), поэтому фактический объемный расход биогаза при высоких нагрузках по органическому веществу больше рассчитанного. К сожалению, данных по качественному составу биогаза для этого биореактора нет. Содержание метана в биогазе, образующемся в анаэробном биореакторе типа UASB (используется в производственном цеху № 6 ОАО «Минск Кристалл»), в период относительно стабильной эксплуатации при средних нагрузках по органическим веществам не коррелирует с нагрузкой по органическим веществам и объемным расходом биогаза, колеблется в довольно узких пределах – от 58 до 70 %.

Для учета биогаза необходимо измерение комплекса показателей: объемного расхода, температуры и давления биогаза – для приведения объемного расхода к нормальным условиям, удельной доли компонентов биогаза (в первую очередь – метана) – для расчета теплотворной способности. Кроме того, полная система учета биогаза позволит принимать обоснованные решения по управлению процессом анаэробной очистки.

#### **Литература**

1. Abbasi, T. Biogas Energy / T. Abbasi, S. M. Tauseef, S. A. Abbasi. – SpringerBriefs in Environmental Science, 2012. – 184 p.
2. Mariraj Mohan, S. A review on upflow anaerobic sludge blanket reactor: Factors affecting performance, modification of configuration and its derivatives / S. Mariraj Mohan, T. Swathi // Water Environment Recourses. – 2022. – Vol. 94, № 1. – P. 1665–1679. – Doi: 10.1002/wer.1665.
3. Wainaina, S. Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review / S. Wainaina [et al.] // Bioengineered. – 2019. – Vol. 10, № 1. – P. 437–458. – Doi: 10.1080/21655979.2019.1673937.

4. Хиневич, В. И. Пути повышения выхода биогаза при эксплуатации анаэробного биореактора с гранулированным илом в производственном цехе № 6 ОАО «Минск Кристалл» – Управляющая компания холдинга «Минск Кристалл Групп» / В. И. Хиневич, М. В. Рымовская, А. Н. Навресь, И. Н. Кузнецов // Технология органических веществ: материалы 85-ой науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 1–13 февраля 2021 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО «БГТУ». – Минск: БГТУ, 2021. – С. 357–359.

5. Рымовская, М. В. Анализ работы анаэробного биореактора с псевдоожиженным слоем гранулированного ила при очистке сточной воды производства сыров / М. В. Рымовская, А. Н. Навресь, С. А. Витебский // Инновационные технологии в обеспечении качества и безопасности химических и пищевых продуктов: материалы Международной науч.-техн. конф., Ташкент, 24–25 сентября 2021 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание Усманов Б. Ш.; Ташкентский химико-технологический институт. – Ташкент, 2021. – С. 88–89.

6. Маркевич, Р. М. Биотехнологическая переработка промышленных отходов: электронный курс лекций для студентов специальности 1-48 02 01 «Биотехнология» / Р. М. Маркевич, И. А. Гребенчикова, М. В. Рымовская. – Минск: БГТУ, 2018. – 301 с.

7. Об учете природного газа: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 15.12.2008 г., № 1934 (в ред. от 30.12.2020 № 772, от 26.10.2021 г. № 611). – 16 с.

8. Рымовская, М. В. Оценка биохимической активности гранулированного ила в технологии анаэробной очистки сточных вод молокоперерабатывающих производств / М. В. Рымовская, И. С. Ильюкевич, А. Р. Свердлова / Технология органических веществ: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-препод. состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 17 февраля 2023 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО «БГТУ». – Минск: БГТУ, 2023. – С. 401–405.