

Обзор современного состояния анаэробной очистки сточных вод бродильных производств

М.А. ГЛАДЧЕНКО, В.И. СКЛЯР, С.В. КАЛЮЖНЫЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

С.С. ЩЕРБАКОВ

Московский государственный университет пищевой промышленности

Продолжение.
Начало см. № 1, 2, 2002 г.

Часть 3. Психрофильные процессы

Наименее изученными являются анаэробные процессы очистки, протекающие при температурах ниже 15 °С. С одной стороны, это объясняется тем, что за рубежом винодельческие и спиртовые заводы расположены в основном в странах с теплым климатом. С другой стороны, при умеренных климатических условиях холодные стоки (ниже 18 °С) бродильных производств имеют невысокое содержание органических загрязнений — от 1,5 до 2,4 кг/м³. Считалось нецелесообразным обрабатывать такие отходы анаэробно, но в последнее время установлено, что анаэробные реакторы с высокой концентрацией биомассы способны эффективно перерабатывать низкоконцентрированные стоки при низких температурах [1, 2, 3].

Применение анаэробных процессов при пониженных температурах вызывает ряд проблем. Жизнедеятельность микроорганизмов формирует концентрационный градиент между ними и жидкой средой, определяя направление диффузии питательных веществ. Концентрационный градиент или диффузионный слой в условиях низкой концентрации субстрата в среде и высокой удельной активности биомассы может лимитировать скорость процесса. Кроме того, снижение температуры сопровождается спадом скорости биохимических процессов. Также при низких температурах увеличивается растворимость газов в жидкости, что приводит к спаду выхода биогаза при анаэробном брожении. Для смягчения диффузионных затруднений, особенно в псих-

рофильных условиях, рекомендуют увеличивать скорости восходящего потока жидкости в реакторе. Происходит снижение концентрационного градиента между активной гранулой и жидкой средой и улучшение массопереноса субстрата к клеткам микроорганизмов [1, 2, 4].

Как показывает литературный анализ, на сегодняшний день низкотемпературные процессы обработки барды изучают лишь в лабораторных условиях. Для этих целей используют UASB-реактор, способный аккумулировать значительные количества активной биомассы. Пионерами в этом вопросе выступили голландские исследователи [1], которые, осуществив процесс очистки винассы при 20 °С, снизили рабочую температуру до 8 °С. Они отметили, что снижение температуры привело к падению активности биомассы на 32 %. Но дальнейшее увеличение линейной скорости потока с помощью рецикла жидкости с 0,5 до 1,5 м/ч привело к восстановлению активности в среднем на 15–20 %. Литературные данные по анаэробной обработке жидких отходов виноделия и спиртовой промышленности в психрофильном режиме приведены в таблице.

Другие лабораторные исследования [5, 6, 3, 4, 7] очистки винных стоков в UASB-реакторе показали, что наличие легко разлагаемых соединений (углеводов) в барде способствует росту кислотогенных микроорганизмов в реакторе, что подтверждалось большим объемом внешней оболочки, покрывающей гранулы ила. Такого рода агрегаты ила создают существенные диффузионные затруднения для расположенных в центре агрегатов микроорганизмов, осуществляющих конверсию летучих жирных кислот, что неминуемо сказыва-

ется на производительности процесса [6, 4]. Для решения данной проблемы ученые предложили осуществлять преацидификацию винного стока перед его подачей в UASB-реактор, что привело к повышению эффективности очистки. Проведенные в реакторе кинетические исследования подтвердили, что увеличение скорости восходящего потока жидкости в реакторе (с 0,144 до 0,644 м/ч) приводит к уменьшению диффузионных ограничений. Кроме того, несмотря на низкую температуру в реакторе (4...10 °С), происходило существенное обесцвечивание винного стока, а степень разложения полифенольных соединений, вносящих основной вклад в цветность стока, составляла 20–40 %.

Анализ литературных данных показывает, что возможность применения высокоскоростных анаэробных систем в психрофильных условиях в основном зависит от количества ила в реакторе, его развития при психрофильных условиях; природы органических загрязнений в обрабатываемых сточных водах; конфигурации реактора, его способности удерживать активную биомассу. Для достижения более высокой эффективности процесса конверсии органических загрязнений при низких температурах, особенно в случае многокомпонентных стоков, предпочтительнее использовать двухстадийные системы.

Для иллюстрации этого факта были проведены лабораторные исследования системы, включающей два последовательно работающих UASB-реактора, инкулированных уже адаптированным к пониженным температурам анаэробным илом [3, 4, 7]. Полученные результаты подтвердили перспективность такого рода установок, перерабатывающих холодные

Рабочие характеристики аппаратов	Результаты лабораторных испытаний UASB-реакторов со взвешенно-седиментирующим слоем биомассы						
	8	10	7	4	10	7	4
T ¹ , °C							
V _{РЕАКТ} ² , м ³	0,015	0,0027	0,0027	0,0027	2·0,0027	2·0,0027	2·0,0027
ХПК _{инф} ³ , кгХПК/м ³	0,2–0,4	4,2	3,2	2,0	4,3	3,5	2,6
ГВУ ⁴ , ч	14–1,5	20,4	26,4	27,8	48	48	43,2
НОВ ⁵ , кгХПК/(м ³ ·сут)	0,7–6,4	5,3	3,1	1,7	2,2	1,8	1,3
Скорость потока, м/ч	0,5–1,5	0,144	0,612	0,644	0,07–0,57	0,07–0,57	0,07–0,57
Э ⁶ , %	65–32	68	61	57	78	76	71
Ссылка	[1]	[5, 6, 3, 4, 7]			[3, 4, 7]		

¹ Температура.

² Объем реактора.

³ Химическое потребление кислорода.

⁴ Гидравлическое время удержания жидкости в реакторе.

⁵ Нагрузка по органическому веществу.

⁶ Эффективность удаления ХПК.

винные стоки. Это связано с тем, что в двухстадийных схемах происходит частичное разделение фаз анаэробного брожения, в результате на второй ступени создаются более оптимальные условия для развития синтрофных и метаногенных микроорганизмов, активность которых и лимитирует эффективность очистки.

Таким образом, приведенные факты свидетельствуют, что сегодня метод анаэробной очистки стоков винодельческой и спиртовой промышленности достаточно разработан для крупномасштабного внедрения в производство. В особенности это относится к утилизации высококонцентрированных стоков, для которых анаэробная обработка экономически более предпочтительна, чем аэробная. Существенные недостатки аэробных технологий — высокие энергозатраты на аэрацию и проблемы, связанные с обработкой и утилизацией больших количеств образующегося избыточного ила [биомассы микроорганизмов — 0,5–0,6 кг на каждый удаленный килограмм биологического потребления кислорода (БПК)], имеющего очень низкую водоотдающую способность. Использование технологии естественной длительной сушки ила на площадках приводит к отчуждению значительных площадей плодородных земель, а также к ухудшению экологической обстановки [8]. В анаэробных процессах очистки отсутствуют затраты энергии на аэрацию, их протекание сопряжено с образованием ценного энергоносителя — метана. Образуется всего лишь 0,1–0,2 кг ила на каждый удаленный килограмм БПК. Таким образом, в анаэробном процессе значительно более низкий прирост ила, обладающего к тому же хорошими водоотдающими свойствами, практически полностью решает проблему обработки и утилизации ила.

Технико-экономическое обоснование

Экономика от внедрения анаэробной очистки может быть оценена на примере строительства UASB-реактора на винодельческом заводе мощностью 10 тыс. т винограда в год. При этом экономическая эффективность в большой степени будет зависеть от климатических условий местонахождения завода.

Ежедневная продукция сточных вод на этом заводе составляет в среднем 150 м^3 со средней загрязненностью 10 кг ХПК/м^3 и содержанием взвешенных веществ (ВВ) $2,2 \text{ кг/м}^3$ [9]. Для обработки такого количества сточных вод потребуются UASB-реактор с рабочим объемом не более 150 м^3 (гидравлическое время пребывания примерно 1 сут). При 90 % эффективности удаления ХПК загрязнений реактор ежедневно будет производить $(9 \text{ кг ХПК/м}^3 \cdot 0,5 \text{ м}^3 \text{ биогаза}) 675 \text{ м}^3 \text{ биогаза}$ (70 % метана). Так как, $1 \text{ м}^3 \text{ биогаза}$ при переводе его в электроэнергию на серийно производимых газогенераторах эквивалентен по энергетической ценности $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, ко-

торый в настоящее время стоит 44 коп., то ежедневный доход от биогаза может быть оценен как

$$0,44 \text{ руб} \cdot 675 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 297 \text{ руб.},$$

что в годовом исчислении составляет

$$297 \text{ руб} \cdot 365 \text{ сут} = 108\,405 \text{ руб.} \\ (36\,13,5 \text{ долл. по курсу } 30 \text{ руб/долл.}).$$

За сброс стоков с показателем по ХПК более $0,5 \text{ кг/м}^3$ и за содержание взвешенных веществ государство в соответствии с постановлением № 632 Совета Министров РФ за 1993 г. должно взыскивать с предприятий $0,316 \text{ руб.}$ за 1 кг избыточного ХПК и за содержание взвешенных веществ в сточной воде — в размере 1290 руб./т . Предлагаемая технология будет ежегодно экономить:

$$150 \text{ м}^3 \cdot 9,5 \text{ кг ХПК/м}^3 \cdot 365 \text{ сут} \cdot 0,316 \text{ руб.} = \\ = 164\,359,5 \text{ руб.}$$

$$150 \text{ м}^3 \cdot 2,2 \text{ кг ВВ/м}^3 \cdot 365 \text{ сут} \cdot 1,29 \text{ руб./кг} = \\ = 155\,380,5 \text{ руб.}$$

Это составит $319\,740 \text{ руб.}$ ($10\,658 \text{ долл.}$). Следует заметить, что в России в настоящее время большинство существующих предприятий не платит таких сумм коммунальным службам за обработку сточных вод, предпочитая губить окружающую среду и время от времени платить мизерные штрафы за нанесенный экологический ущерб.

Из зарубежных источников известно, что капитальные затраты, приведенные на 1 м^3 реактора типа UASB, составляют $500\text{--}750 \text{ долл.}$ для стран Западной Европы и $280\text{--}350 \text{ долл.}$ для стран Латинской Америки. Учитывая существующий уровень цен и зарплат, для России ближе латиноамериканские расценки — 300 долл./м^3 реактора. Капитальные затраты для реактора вместимостью 150 м^3 равны $45\,000 \text{ долл.}$ Эксплуатационные расходы оценивают на Западе как $0,05 \text{ долл./м}^3$ сточной воды. В нашем случае ежегодно $150 \text{ м}^3 \cdot 365 \text{ сут} = 54\,750 \text{ м}^3$ они равны $2737,5 \text{ долл.}$

Таким образом, сроки окупаемости капитальных затрат UASB-реактора, функционирующего при мезофильных условиях (30°C), учитывая стоимость биогаза, платежи муниципальных предприятиям по обработке сточных вод и эксплуатационные расходы, составят:

$$45\,000 \text{ долл.}/(3613,5 \text{ долл.} + 10\,658 \text{ долл.} - \\ - 2737,5 \text{ долл.}) = 3,9 \text{ года.}$$

UASB-реактор, функционирующий при субмезофильных условиях (20°C) и психрофильных (10°C), позволяет дополнительно экономить денежные средства за счет отсутствия подогрева сточной воды перед подачей в реактор на 10 и 20°C , так как сточные воды имеют температуру 20°C . Количество теплоты, необходимое

для подогрева сточной воды на 10°C за год, составит $10^\circ\text{C} \cdot 1000 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ (теплоемкость воды) $\cdot 150 \text{ м}^3 \cdot 365 \text{ сут} = 547,5 \text{ Гкал}$. На 20°C 20°C составит $20^\circ\text{C} \cdot 1000 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ (теплоемкость воды) $\cdot 150 \text{ м}^3 \cdot 365 \text{ сут} = 1095 \text{ Гкал}$. Стоимость 1 Гкал теплоты составляет 204 руб. :

$$547,5 \text{ Гкал} \cdot 204 \text{ руб.} = 111\,690 \text{ руб.} (3723 \text{ долл.}), \\ 1095 \text{ Гкал} \cdot 204 \text{ руб.} = 223\,380 \text{ руб.} (7446 \text{ долл.}).$$

Сроки окупаемости капитальных затрат UASB-реактора с учетом экономии денежных средств за счет отсутствия подогрева сточной воды составят:

$$45\,000 \text{ долл.}/(3613,5 \text{ долл.} + \\ + 10\,658 \text{ долл.} - 2737,5 \text{ долл.} + \\ + 3723 \text{ долл.}) = 2,9 \text{ года,}$$

$$45\,000 \text{ долл.}/(3613,5 \text{ долл.} + \\ + 10\,658 \text{ долл.} - 2737,5 \text{ долл.} + \\ + 7446 \text{ долл.}) = 2,4 \text{ года.}$$

Авторы надеются, что данный обзор внесет свой вклад в развитие и распространение в России анаэробной биологической очистки стоков броидильных производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Man de A. W. A., Last Van der A. R. M., Lettinga G. The use of EGSB and UASB anaerobic systems for low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8 to 30°C //Anaerobic Digestion 1988 (Adv. Wat. Pollut Control №. 5)/Ed. E. R. Hall and P. N. Hobson. — Pergamon Press. — 1988. — P. 197–209.
2. Kalyuzhnyi S. V., Gladchenko M. A., Sklyar V. I., Kurakova O. V. & S. S. Shcherbakov. The UASB treatment of winery wastewater under mesophilic and psychrophilic conditions.//Environ. Technol. — 2000. — V. 21. — P. 919–925.
3. Kalyuzhnyi S. V., Gladchenko M. A., Sklyar V. I., Kizimenko Y. S. & S. S. Shcherbakov. Psychrophilic one- and two-step system for pretreatment of winery wastewater.//Proceedings of the VI Latin-American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion (Recife, Brazil). — 2000. — V. I. — P. 44–52.
4. Kalyuzhnyi S. V., Gladchenko M. A., V. I. Sklyar, Y. S. Kizimenko & S. S. Shcherbakov. One- and two-stage upflow anaerobic sludge-bed reactor pretreatment of winery wastewater at 4–10 degrees C.//Appl. Biochem. Biotech. — 2001. — V. 90. — № 2. — P. 107–124.
5. Kalyuzhnyi S. V., Lsklyar V. I., Gladchenko M. A., Kurakova O. V. & S. S. Shcherbakov. The UASB treatment of winery wastewater under mesophilic and psychrophilic conditions.//Proc. of the Intern. Symp. «Energy and Agriculture Towards the Third Millenium» (Athens). — 1999. — P. 309–316.
6. Kalyuzhnyi S. V., Gladchenko M. A., Sklyar V. I., Kurakova O. V. & S. S. Shcherbakov. The UASB treatment of winery wastewater under mesophilic and psychrophilic conditions.//Environ. Technol. — 2000. — V. 21. — P. 919–925.
7. Kalyuzhnyi S. V., Gladchenko M. A., Sklyar V. I., Kizimenko Ye. S., Shcherbakov S. S. Psychrophilic one- and two-step systems for pre-treatment of winery waste water. — Wat. Sci. Technol., 2001, V. 44, P. 23–31.
8. Bazua de C. D., Cabrero M. A. Vinasses biological treatment by anaerobic and aerobic processes: laboratory and pilot-plant tests.//Bioresource Technol. 1991. — № 35. — P. 87–93.
9. Гумбатов Т. Ф., Гасонов М. В., Гумбатов П. Т., Осокина Т. А. Характеристика сточных вод заводов первичного виноделия//Виноделие и винодарство СССР. — 1984. — № 3. — С. 24–27.