

И. А. Ровенская, ассистент; Н. С. Ручай, доцент;  
О. Ю. Фролова, студентка; Т. П. Сергеева, студентка

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНОЙ ВОДЫ МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА В АНАЭРОБНЫХ БИОРЕАКТОРАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Process of milk processing plant wastewater anaerobic treatment in flow bioreactors has been studied. Three bioreactor types of greatest interest for commercial use have been investigated: a bioreactor with the fixed carrier and ascending liquid stream, a bioreactor with granulated active sludge (combined UASB-reactor) and a biosorber with fluidized activated carbon as a sorbent. It has been found that the biosorber is highly efficient, providing the necessary wastewater purification degree (70% on COD) with sewage processing time of 0,8 h and organic load of 30,8 kg COD/(m<sup>3</sup>·day).

It has been shown that the combined bioreactor based on UASB-reactor, with specific productivity of 8,7 kg COD/(m<sup>3</sup>·day), is suitable for commercial use.

**Введение.** В последнее десятилетие в европейских странах определилась тенденция к широкому применению анаэробных методов обработки производственных сточных вод, что привело к созданию энергосберегающих технологий на основе новых конструкций высокоэффективных биореакторов [1–2].

Анаэробные технологии наиболее перспективны для предварительной очистки стоков, так как позволяют при минимальных эксплуатационных затратах достичь высокой степени очистки и, в некоторых случаях, в результате использования образующегося биогаза в качестве источника энергии становятся экономически выгодными [3].

В мировой практике для реализации анаэробного метода очистки промышленных стоков разработан ряд конструкций биореакторов, различающихся эффективностью очистки, удельной производительностью по деструктируемому загрязнению, эксплуатационными затратами [3–6]. Выбор типа биореактора, наиболее пригодного для очистки конкретного промышленного стока, может быть осуществлен только на основании экспериментальных данных, полученных в результате моделирования процесса.

В Республике Беларусь анаэробные технологии предварительной очистки промышленных сбросов пока не нашли применения, хотя многие предприятия, в частности молочные заводы, остро нуждаются в энергосберегающих биоочистных установках.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка эффективности функционирования биореакторов различной конструкции при анаэробной очистке сточной воды молокоперерабатывающего производства.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования являлся производственный сток одного из молочных заводов г. Минска. Общий уровень загрязненности сточной воды по химическому потреблению кислорода (ХПК) – 1400–3300 мг/л, показатель биологиче-

ского потребления кислорода (БПК) – 80–90% от величины ХПК, рН 8–9 [7, 8].

Процесс анаэробной обработки сточной воды в проточном режиме моделировали в биореакторах трех типов, представляющих наибольший интерес для промышленного использования: анаэробном биофильтре, биореакторе с гранулированным активным илом (комбинированный UASB-реактор) и в биосорбере с псевдооживленным слоем частиц сорбента – активированного угля.

Анаэробный биофильтр (рис. 1, а) представляет собой герметичный аппарат цилиндрической формы, в котором закреплена неподвижная, чаще всего волокнистая насадка. Биореактор такого типа прост по конструкции и в эксплуатации. Деструкцию загрязнений сточной воды осуществляют закрепленные на насадке в виде биопленки спонтанно развивающиеся микроорганизмы, а также крупные агрегаты (хлопья) микробного ила, физически удерживаемые насадкой.

Комбинированный биореактор (рис. 1, б) имеет две реакционные зоны: нижняя (UASB-реактор) обеспечивает самопроизвольное уплотнение хлопьев активного ила с образованием гранул, которые не выносятся из аппарата восходящим потоком жидкости, накапливаются в нем и создают высокую концентрацию активного ила в реакционном объеме. Верхняя зона (30–40% от общего объема аппарата) – анаэробный биофильтр с волокнистой насадкой, одновременно выполняющий функции газоотделителя.

В биосорбере с псевдооживленным слоем (рис. 1, в), циркулирующая через реакционную зону очищаемая вода поддерживает во взвешенном состоянии частицы сорбента, на поверхности которых формируется биопленка из микроорганизмов активного ила, деструктируя загрязнения. Биосорбер требует значительных затрат энергии на циркуляцию жидкости для псевдооживления частиц сорбента [9, 10].

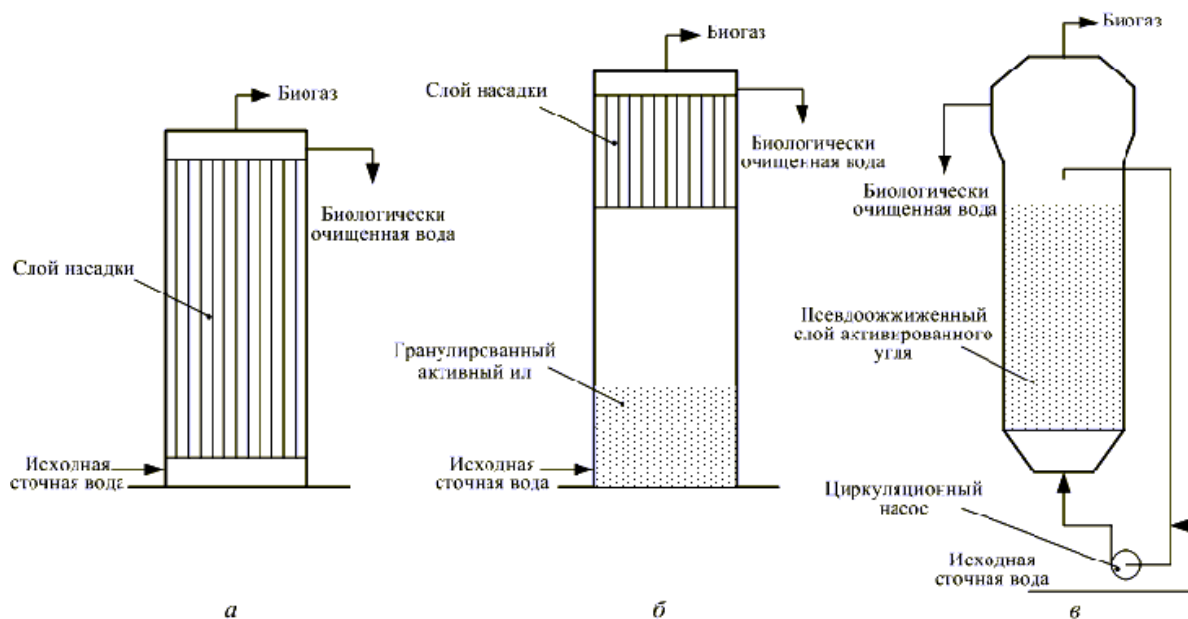


Рис. 1. Схема конструкции биореакторов: *а* – анаэробный биофильтр; *б* – комбинированный UASB-реактор; *в* – биосорбер с псевдооживленным слоем активированного угля

В экспериментах все три типа биореакторов были представлены соответствующими лабораторными моделями. Анаэробный биофильтр имел объем 1,2 л при плотности упаковки волокнистой насадки (насадка «ВИЯ») 12 г/л. Объем комбинированного биореактора – 2,2 л, 36% которого занимает волокнистая насадка «ВИЯ» с плотностью упаковки 12 г/л. Высота колонки биосорбера – 350 мм, внутренний диаметр – 24 мм. Масса активированного угля в биосорбере – 20 г (активированный уголь АГ-5 с размером частиц 0,25–0,5 мм). Линейная скорость циркулирующего через биосорбер потока жидкости для псевдооживления частиц сорбента — 12–15 м/ч. Биореакторы функционировали в мезофильном режиме (30°С). Температуру процесса поддерживали термостатированием аппаратов. Непрерывное дозирование исходной сточной воды в аппарат и циркуляцию жидкости в биосорбере осуществляли перистальтическими насосами. Скорость потока сточной воды изменяли в пределах 0,01–1,26 ч<sup>-1</sup>. В экспериментах засев биореакторов инокулятом не производили, создавая условия для естественного формирования хлопьев и гранул активного ила из спонтанно развивающихся в очищаемой воде микроорганизмов.

Анаэробный биофильтр и биосорбер выводили на стабильный режим функционирования в течение 1,5 мес. при малой нагрузке на биореактор по загрязнению (удельная скорость потока жидкости через биореактор – до 0,1 ч<sup>-1</sup>), после чего определяли показатели очистки сточной воды при различных нагрузках по жидкостному потоку. Отбор проб биологически очищенной воды (БОВ) для анализа осуществляли после не

менее 1,5-кратной смены всего объема жидкости в аппарате при заданной скорости разбавления среды. Стабильный режим функционирования комбинированного биореактора был достигнут через 4 мес. эксплуатации. За это время сформировались визуально наблюдаемые гранулы активного ила. Продолжительный запуск биореакторов обусловлен низкой скоростью накопления биомассы анаэробными бактериями.

**Результаты и их обсуждение.** Эксперименты показали (табл. 1), что в анаэробных условиях степень очистки сточной воды молокоперерабатывающего производства при малой скорости протока достигает 97% по ХПК. Допустимый уровень загрязнений производственного стока, направляемого в городскую канализационную сеть, составляет 1000 мг/л по ХПК.

Как следует из таблицы, такой уровень загрязненности стока молочного завода достигается при удалении из сточной воды 70% загрязнений по ХПК. Требуемую степень очистки стока можно получить при продолжительности обработки сточной воды в анаэробном биофильтре 21 ч, в комбинированном биореакторе – 5,8 ч, в биосорбере с псевдооживленным слоем сорбента – 0,8 ч. В этих условиях удельная производительность биореакторов по деструктируемым загрязнениям составляет: анаэробного биофильтра – 2,7 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут), комбинированного биореактора – 8,7 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут), биосорбера – 30,8 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут) (рис. 2). Высокая производительность биосорбера обусловлена благоприятными условиями для массообмена в псевдооживленном слое и большой поверхностью частиц сорбента, покрытых биопленкой, что обеспечивает удержание в аппара-

те биомассы активного ила в высокой концентрации, а также сорбционными свойствами активированного угля, который способен к сорбции загрязнений сточной воды, микробных клеток и их экзоферментов, формируя таким образом специфическую биосистему с высокой деструктивной активностью.

В связи с явным преимуществом биосорбера перед другими биореакторами в скорости массо-

обмена определим показатели функционирования этого аппарата при очистке стока в условиях аэробно-анаэробного биопроцесса. Процесс отличался только тем, что циркулирующую через биосорбер жидкость продували воздухом для насыщения кислородом. Как и следовало ожидать, в аэробных условиях обработки стока производительность биосорбера существенно возросла и достигла 44 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут) при требуемой степени очистки (табл. 2).

Таблица 1

**Показатели процесса очистки сточной воды  
молокоперерабатывающего производства в анаэробных условиях**

Скорость протока сточной воды, ч <sup>-1</sup>	Загрязненность сточной воды по ХПК, мг/л	Остаточная загрязненность очищенной воды по ХПК, мг/л	Количество удаленных загрязнений по ХПК, мг/л	Степень очистки сточной воды по ХПК, %	Удельная производительность биореактора, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут)
<b>Биофильтр</b>					
0,016	3300	560	2740	83	1,1
0,035		760	2540	77	2,1
0,047		880	2420	73	2,7
0,075		1420	1880	57	3,4
<b>Комбинированный биореактор</b>					
0,01	3000	90	2910	97	0,7
0,04		320	2680	89	2,6
0,075		500	2500	83	4,5
0,173		900	2100	70	8,7
<b>Биосорбер</b>					
0,13	1400	140	1260	90	3,9
0,37		220	1180	84	10,5
0,45		260	1140	81	12,3
1,26		380	1020	73	30,8

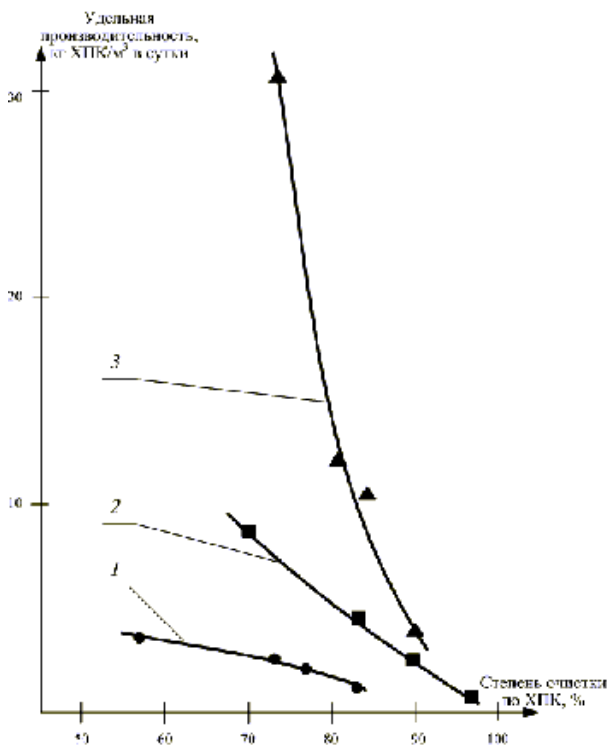


Рис. 2. Сравнительная эффективность функционирования анаэробных биореакторов:  
1 – биофильтр; 2 – комбинированный биореактор; 3 – биосорбер

**Показатели функционирования биосорбера  
при очистке сточной воды в условиях аэриоза**

Скорость потока сточной воды, ч <sup>-1</sup>	Остаточная загрязненность сточной воды по ХПК, мг/л	Количество удаленных загрязнений по ХПК, мг/л	Степень очистки сточной воды по ХПК, %	Удельная производительность биореактора, кг ХПК/(м <sup>3</sup> ·сут)
0,13	180	1890	91,3	5,9
0,37	315	1755	84,8	15,6
0,45	330	1740	84,0	18,8
1,26	600	1470	71,0	44,4

**Заключение.** Анаэробный биохимический процесс с использованием иммобилизованных микроорганизмов позволяет осуществить очистку сточной воды молокоперерабатывающего производства по показателю ХПК на 97%. Из числа исследованных анаэробных биореакторов самым высокопроизводительным является биосорбер с псевдооживленным слоем частиц активированного угля, который обеспечивает требуемую степень очистки стока (70% по ХПК) при времени обработки сточной воды в аппарате 0,8 ч и нагрузке по разрушаемым загрязнениям 30,8 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут). При переходе на аэробный режим функционирования удельная производительность биосорбера возрастает до 44,4 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут). Принимая во внимание необходимость значительных затрат энергии на псевдооживление сорбента в биосорбере, можно рекомендовать также для использования в производстве комбинированный биореактор на основе UASB-реактора (с гранулированной биомассой активного ила), удельная производительность которого составляет 8,7 кг ХПК/(м<sup>3</sup>·сут).

Окончательный выбор типа биореактора будет определяться местными условиями на предприятии.

### Литература

1. Колесов, Ю. Ф. Аппараты для анаэробной биологической очистки сточных вод / Ю. Ф. Колесов // Изв. строительство. – 1996. – № 1. – С. 89–92.
2. Репин, Б. Н. Современные технологии анаэробной обработки производственных сточных вод / Б. Н. Репин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 5. – С. 27–29.
3. Калужный, С. В. Анаэробная биологическая очистка сточных вод / С. В. Калужный, Д. А. Данилович, А. Н. Ножевникова // Итоги науки и техники. Сер. биотехнол. – 1991. – № 29. – 156 с.
4. Очистка промышленных сточных вод прикрепленными микроорганизмами / П. И. Гвоздяк [и др.] // Химия и технология воды. – 1985. – Т. 7, № 1. – С. 64–68.
5. Кравец, В. В. Современное состояние использования биодисков в практике очистки сточных вод / В. В. Кравец, И. В. Березовская // Химия и технология воды. – 1994. – Т. 16, № 2. – С. 209–216.
6. Технологія анаэробного очищення стічних вод на основі гранульованої біомаси / С. О. Потапенко [та інш.] // Экотехнол. и ресурсосбережение. – 1995, № 3. – С. 41–48.
7. Ровенская, И. А. Технология анаэробной биологической очистки сточной воды молокоперерабатывающего производства / И. А. Ровенская, Н. С. Ручай, Н. В. Гриц // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2005. – Т. 10, № 4. – С. 76–79.
8. Ровенская, И. А. Очистка сточной воды молокоперерабатывающего производства в анаэробных биореакторах с иммобилизованными микроорганизмами / И. А. Ровенская, Н. С. Ручай, Н. В. Гриц // Вести НАН. Сер. биол. – 2006. – № 1. – С. 72–76.
9. Liuchun, Yang. [Исследование реактора с псевдооживленным слоем] / Yang Liuchun, Tong Zhiquan // Environ. Sci. – 2003. – № 5. – С. 39–43.
10. Ручай, Н. С. Экологическая биотехнология: учеб. пособие / Н. С. Ручай, Р. М. Маркевич. – Минск: БГТУ, 2006. – 312 с.