

Яромский В.Н., Яковчиц М.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПУЛЬСАЦИОННОГО БИОРЕАКТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Одним из приоритетных инженерно-экологических направлений водохозяйственной деятельности молочной промышленности является внедрение на действующих предприятиях эффективных систем очистки производственных сточных вод, характеризующихся компактностью, высокой окислительной мощностью и малой энергоемкостью.

Анализ существующих методов очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий от органических загрязнений позволил сделать вывод о том, что важное место среди существующих методов занимает биологическая очистка [1]. Эффективность метода во многом определяется типом сооружения. Традиционные сооружения биологической очистки имеют свои достоинства и недостатки и позволяют определить пути поиска новых высокоэффективных способов аппаратного оформления процесса биологической очистки. В последнее время большой интерес вызывают комбинированные биологические сооружения [2,3], совмещение основных достоинств аэротенков и биофильтров в одном сооружении позволяет интенсифицировать процесс биологической очистки.

Поиск путей реализации основных направлений интенсификации процесса биологической очистки привел к созданию конструкции пульсационного биореактора [4]. В процессе очистки сточных вод в пульсационном биореакторе участвует как взвешенная так и иммобилизованная на дисках насадки биомасса, что позволяет отнести данный аппарат к комбинированным биологическим сооружениям. Помимо использования комбинированного действия иммобилизованного и свободноплавающего биоценоза процесс биологической очистки в пульсационном биореакторе интенсифицируется за счет повышения массообменных характеристик процесса, вследствие наложения низкочастотных колебаний на взаимодействующие фазы [5]. Созданный аппарат не имеет аналогов, относится к биореакторам нового поколения, тенденция применения которых в технологии очистки сточных вод намечена в связи с необходимостью очистки высококонцентрированных сточных вод и резким ухудшением экологической ситуации. Однако для практического внедрения запатентованной конструкции биореактора необходимо выполнить комплекс экспериментальных исследований по определению технологических параметров работы аппарата.

Испытания пилотной установки пульсационного биореактора производили на базе ОАО «Пружанский молочный комбинат» в условиях реального стокообразования. Основной целью экспериментальных исследований явилось определение основных технологических параметров аппарата, необходимых для разработки рекомендаций на проектирование локальных очистных сооружений для молокоперерабатывающих предприятий, а также подтверждение целесообразности применения пульсационного биореактора в качестве блока биологической очистки на локальных очистных сооружениях для очистки производственных сточных вод до норм сброса в городскую канализацию.

Образующиеся на Пружанском молочном комбинате сточ-

ные воды характеризуются высокой концентрацией органических загрязнений и взвешенных веществ. Анализ состава производственных сточных вод показал, что концентрации загрязнений сильно колеблются в течение времени, что вызвано особенностями технологических процессов производства. Изучение качественного состава сточных вод комбината показало, что концентрации компонентов загрязнений производственных сточных вод имеет значительный диапазон колебаний, что обусловлено как различным ассортиментом продукции, так и колебаниями расхода и загрязненности стока в течение суток. Фазово-дисперсный состав сточных вод относительно однороден, дисперсная фаза представлена, в основном, жирами и частицами скоагулировавшего белка. Азот в производственных сточных водах комбината содержится в основном в виде аминокислотных соединений, в небольших количествах в сток также попадает азот аммонийных солей из аммиачных компрессоров. Содержание общего азота составляет 50 – 60 мг/л, концентрация фосфора 7 – 16 мг/л.

Таким образом, анализ состава, а также соотношение биогенных элементов в производственных сточных водах Пружанского молочного комбината подтверждают правильность выбранного метода очистки исследуемой категории сточных вод.

Пилотная установка, изображенная на рис. 1, с максимальной производительностью 1,5 м³/сут. состояла из пульсационного биореактора 2 с рабочим объемом 0,031 м³, вторичного отстойника 4 общим объемом 0,143 м³ и уплотнителя-регенератора 6 емкостью 0,05 м³. Конструктивные параметры пульсационного биореактора соответствовали оптимальным, определенным в результате лабораторных исследований [6], при которых наблюдаются максимальные значения объемного коэффициента массопередачи, а следовательно, и максимальная скорость биологической очистки: частота колебания насадки $n=1,3$ Гц, амплитуда колебания $S=67$ мм, площадь насадки $F_n=0,906$ м²; расстояние между дисками насадки $\Delta=12$ мм. Насадка биореактора состояла из набора перфорированных дисков, изготовленных из винипласта, диаметром 200 мм, толщиной 6 мм. Площадь перфорации дисков насадки – 3,84 % площади диска, диаметр перфорированных отверстий – 8 мм, общее число дисков – 15 шт.

Сточная жидкость к экспериментальной установке подводилась по напорному трубопроводу 1. Рециркуляционная биомасса из вторичного отстойника 4, пройдя уплотнение в уплотнители-регенераторе 6, подавалась в пульсационный биореактор при помощи рециркуляционного насоса 7. Воздух в аппарат подавался при помощи компрессора 8, расход воздуха определялся при помощи ротаметра 9.

После пульсационного биореактора 2 смесь сточной жидкости и биомассы, пройдя через воздухоотделитель 3, подавалась во вторичный вертикальный отстойник 4, где происходила седиментация биомассы, участвующей в процессе биологической очистки. Осветленная во вторичном отстойнике жидкость при помощи гибкого шланга 5 сбрасывалась в колодец городской канализации.

Яромский Виктор Николаевич, к.т.н., доцент, зав. лабораторией Отдела проблем Полесья НАН Беларуси.

Яковчиц Михаил Владимирович, инженер каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

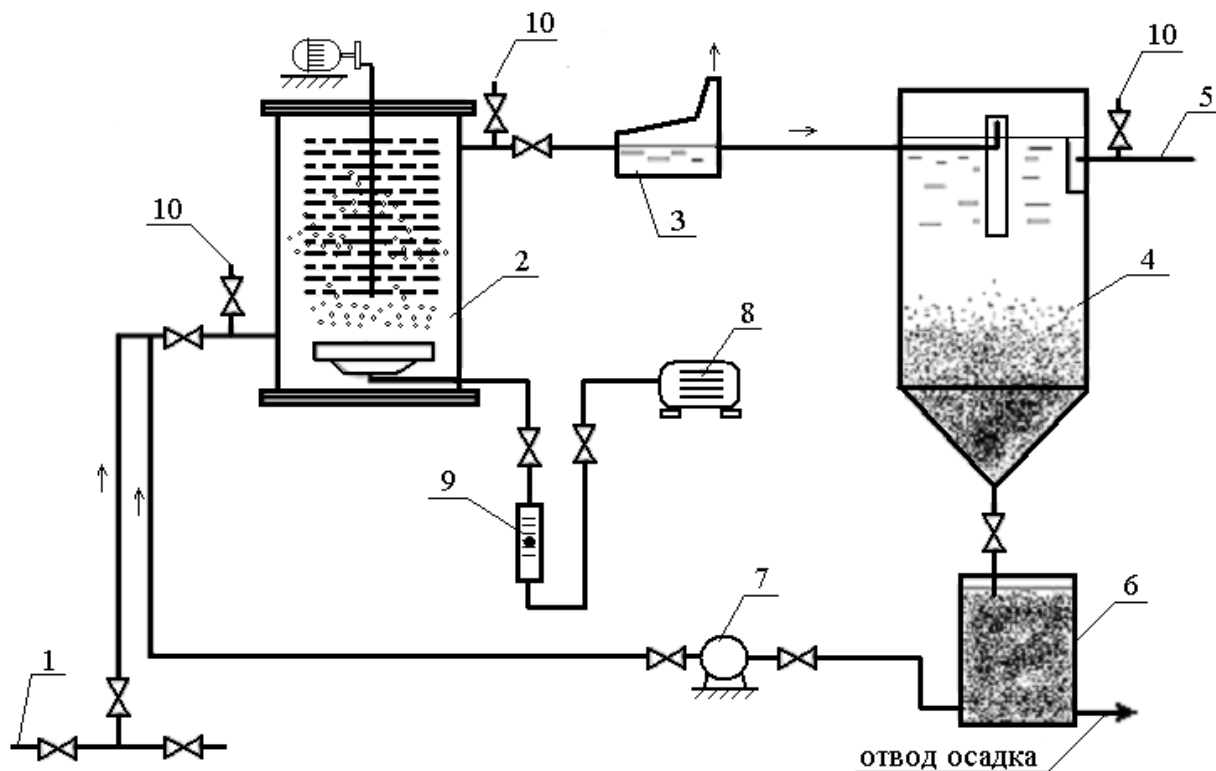


Рис. 1. Схема пилотной установки пульсационного биореактора

1 – напорный трубопровод производственной канализации; 2 – пульсационный биореактор; 3 – воздухоотделитель; 4 – вторичный отстойник; 5 – отвод очищенных стоков; 6 – уплотнитель-регенератор рециркуляционной биомассы; 7 – рециркуляционный насос; 8 – компрессор УК-1М; 9 – ротаметр РС-5; 10 – пробоотборник.

При работе установки контролировались следующие параметры процесса: рН, ХПК_{уск}, БПК_{полн}, доза взвешенной биомассы, время пребывания смеси в биореакторе, температура, содержание кислорода, расходы сточной жидкости и рециркуляционной биомассы, расход осадка. При определении качественных показателей сточных вод отбор проб осуществлялся ступенчато, т.е. вначале отбиралась проба исходной сточной жидкости при входе в биореактор, затем, с учетом времени пребывания смеси в аппарате, осуществлялся отбор пробы на выходе из биореактора. Кроме вышеперечисленных параметров, которые определялись ежедневно во время проведения исследований, осуществлялся и гидробиологический анализ биомассы биореактора.

Основную роль в биологической очистке сточных вод играют процессы, происходящие в клетках микроорганизмов биомассы. Очистка сточной жидкости от органических загрязнений в пульсационном биореакторе осуществляется микроорганизмами, находящимися как во взвешенном (свободноплавающем), так и в иммобилизованном (прикрепленном) состоянии. Организмы взвешенной и прикрепленной биомассы извлекают из сточной жидкости необходимые им питательные вещества и используют их в процессах конструктивного и энергетического обмена. Процесс изъятия органических загрязнений из сточных вод в пульсационном биореакторе взвешенной и прикрепленной биомассой сводится к следующим стадиям:

- массоперенос органического вещества сточных вод к поверхности клеток биомассы;
- гидролиз сложных органических соединений под действием различных ферментов, диффузия вещества через полупроницаемые мембраны клеток;

- окисление органического вещества в ходе внутриклеточных процессов и синтез нового материала клетки. Процесс окисления сопровождается выделением энергии, процесс синтеза идет с ее потреблением.

Гидробиологический анализ и оценка качества биомассы, участвующей в процессе биологической очистки в пульсационном биореакторе, осуществлялась микроскопированием прижизненных бактериальных препаратов и микрофотографированием при помощи электронной системы (МКИ-2-1). Изучая морфологические свойства микроорганизмов, определялся их род и вид, руководствуясь [7,8].

Под микроскопом видно, что биомасса биореактора представляет собой сложный биоценоз различных организмов. Бактериальный состав взвешенной биомассы весьма разнообразен. Характерной особенностью микрофлоры является слизиобразование. Бактериальные клетки, составляющие основу хлопьев взвешенной биомассы, окружены капсулой, благодаря этому они и не слипаются друг с другом [8]. Типичный организм взвешенной биомассы биореактора – *Zooglea ramigera*, образующая разветвленные бактериальные скопления.

Подавляющее большинство бактерий, присутствующих во взвешенной биомассе биореактора, находятся в хлопьях, только отдельные клетки плавают в иловой жидкости. Простейшие весьма разнообразны, представлены в основном инфузориями, среди которых преобладают брюхожесничные и кругоресничные. Характерно присутствие большого числа *Vorticella* (рис.2), *Opercularia* (рис.3), *Carchesium*, *Aspidisca*. Преобладающие формы *Vorticella convallaria* с хорошо развитым околоротовым полем свидетельствуют о хороших условиях процесса биологической очистки.

Особенностью прикрепленной биомассы является то, что с субстратом контактирует только ее поверхностный слой,

толщина которого не превышает 70 мкм [9]. Поэтому наиболее активные клетки микроорганизмов находятся в наружных слоях биопленки, а внутренние, обращенные к фильтрующему материалу, испытывают недостаток кислорода, медленнее окисляют адсорбированные вещества, в них развиваются анаэробные процессы. Об этом свидетельствует наличие в пробах биопленки, отбираемых с дисков насадки пульсационного биореактора, небольшого количества круглых червей *Nematoda* sp и равноресничных инфузорий *Paramecium caudatum*, *Colpidium colpoda*, приспособленных к существованию в условиях низкого содержания кислорода.

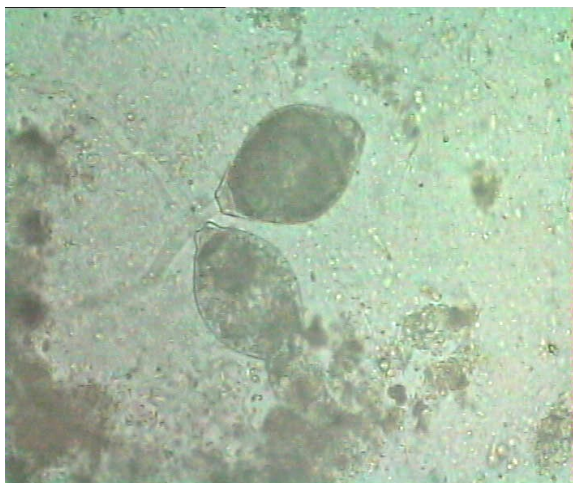


Рис. 2. *Voriticella convallaria*

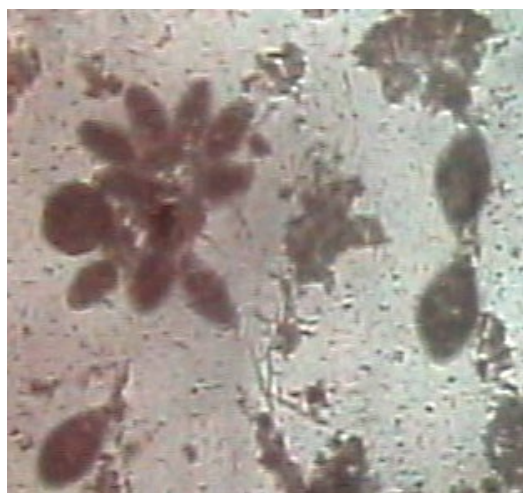


Рис. 3. *Opercularia glomerata*

Грибы и нитчатые бактерии в биомассе пульсационного биореактора присутствуют в небольшом количестве. Они активно минерализуют органические вещества, однако чрезмерное их развитие ухудшает седиментационные свойства взвешенной биомассы. Интенсивное размножение грибов и нитчатых бактерий происходит в результате снижения уровня pH среды до 4-5.

Одним из преимуществ пульсационного биореактора является то, что в нем практически невозможно вспухание взвешенной биомассы, так как в случае развития нитчатых форм они задерживаются на биопленке и не выносятся из аппарата. Условия существования взвешенной и прикрепленной биомассы в биореакторе несколько различны. К биопленке прилипают взвешенные вещества, сорбированные органические вещества на ней меньше подвергаются десорбции, и поэтому организмы биопленки лучше обеспечены питанием, чем организмы взвешенной биомассы. Это позволяет в одном аппара-

те сочетать интенсивность в прикрепленной биомассе и высокую степень очистки во взвешенной биомассе.

На протяжении всего эксперимента велся контроль за уровнем pH производственных сточных вод. Следует отметить, что в отношении изменения активной реакции pH сточной жидкости в процессе биологической очистки выявлены следующие закономерности:

- в интервале значений pH=8,5 – 10 поступающей в биореактор сточной жидкости в процессе биологической очистки происходит снижение pH стока до уровня 7 – 7,5;
- биомасса пульсационного биореактора обладает значительной буферностью и способна сравнительно легко переносить кратковременные колебания pH в интервале от 5 до 10.

С целью определения пропускной способности пилотной установки (рис.1), а также уточнения оптимального времени пребывания производственных сточных вод в пульсационном биореакторе, на первом этапе исследований необходимо было проанализировать влияние гидравлической нагрузки на эффективность работы технологической схемы.

Варьирование гидравлической нагрузки осуществлялось изменением подачи сточной жидкости за счет регулирования работы подающего насоса, а также запорно-регулирующей арматурой на напорной линии. На рис.4 приведены усредненные экспериментальные данные эффекта очистки сточной жидкости по БПК_{полн} при различных значениях гидравлической нагрузки, а, следовательно, и продолжительности обработки сточных вод в пульсационном биореакторе.

На основании полученных данных следует, что при увеличении гидравлической нагрузки на объем биореактора происходит снижение эффекта очистки производственных сточных вод. Это происходит в результате того, что при увеличении гидравлической нагрузки происходит сокращение времени контакта производственных сточных вод с биомассой, участвующей в процессе биологической очистки. По данным проведенных исследований было определено, что для снижения концентрации органических загрязнений в сточных водах молокоперерабатывающих предприятий до норм сброса в городскую канализацию достаточной является гидравлическая нагрузка $q=41,16 \text{ сут}^{-1}$, что соответствует 35 минутному пребыванию сточных вод в биореакторе.

Концентрация взвешенной биомассы в пульсационном биореакторе варьировалась в интервале 3,8 – 4,65 г/л по сухому веществу. Из графика, приведенного на рис.4, видно, что при гидравлической нагрузке $q=41,16 \text{ сут}^{-1}$ максимальный эффект очистки $\mathcal{E}=70,4 \%$ был достигнут при дозе взвешенной биомассы $a_{взв}=4,65 \text{ г/л}$ по сухому веществу. Среднее значение эффекта очистки для изучаемого интервала концентрации взвешенной биомассы составило 62,6 %.

Оценка эффективности работы пульсационного биореактора на стадии локальной очистки производственных сточных вод выполнялась в течение 1-ого месяца при ежедневном технологическом контроле, необходимо было убедиться в стабильности работы технологической схемы (рис.1). Установка работала в непрерывном режиме. Гидравлическая нагрузка на протяжении всего эксперимента составляла $q=41,16 \text{ сут}^{-1}$, доза взвешенной биомассы варьировалась в интервале $a_{взв}=4,2 - 4,8 \text{ г/л}$ по сухому веществу, концентрация прикрепленной биомассы составляла в среднем $a_{np}=15 \text{ г/м}^2$, концентрация кислорода в пульсационном биореакторе поддерживалась в интервале 2,5 – 3,5 мг/л.

В ходе эксперимента определялись фактические показатели качества сточной воды на всех стадиях обработки. По известным зависимостям для каждого опыта рассчитывали эффект очистки и органическую нагрузку. На основании данных, полученных в результате исследования эффективности работы пульсационного биореактора в технологической схеме (рис.1), построена графическая зависимость эффекта очистки производственных сточных вод от органической нагрузки

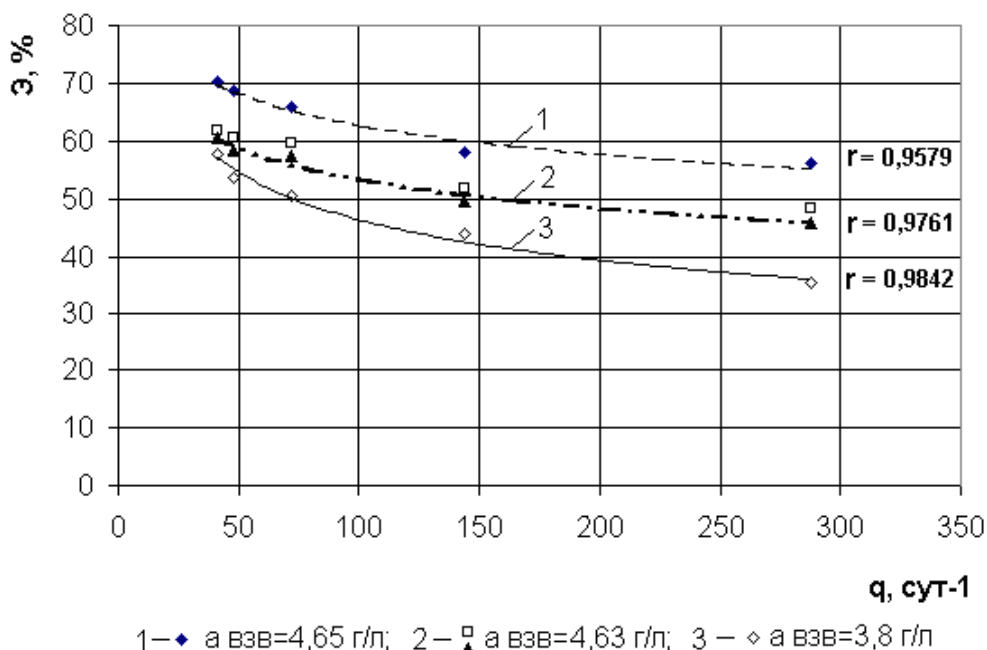


Рис. 4. График зависимости эффекта очистки сточных вод в пульсационном биореакторе от гидравлической нагрузки при различных значениях концентрации биомассы.

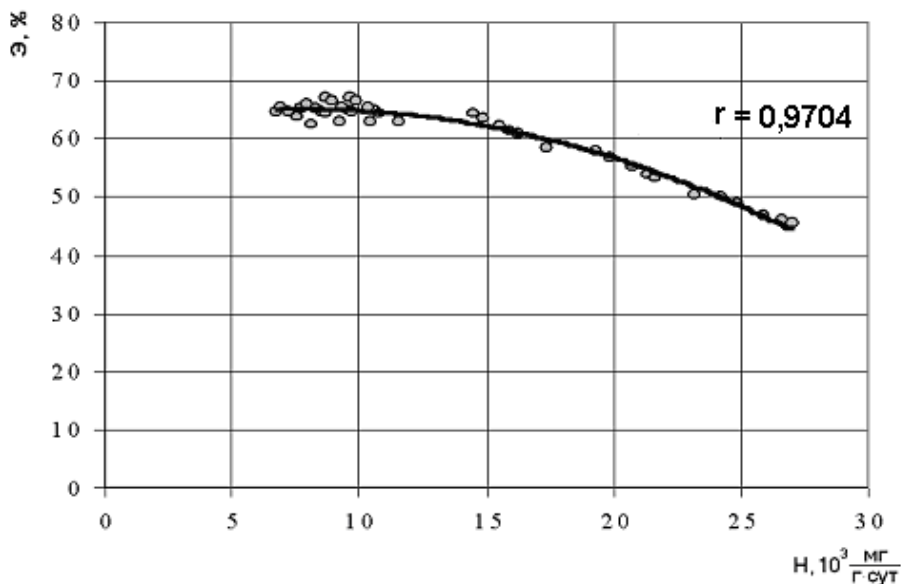


Рис. 5. Зависимость эффекта очистки производственных сточных вод от органической нагрузки.

(рис.5). Из графика, приведенного на рис.5, видно, что эффективность работы пульсационного биореактора определяется органической нагрузкой, при чем стабильный эффект очистки по БПК_{полн} 65 - 68% наблюдается в области органической нагрузки $(6,95 - 17,374) \cdot 10^3 \frac{\text{мг}}{\text{г} \cdot \text{сут}}$, при дальнейшем росте органической нагрузки происходит плавное понижение эффекта очистки.

Анализ результатов производственных испытаний пилотной установки пульсационного биореактора позволил сделать следующие выводы:

- Максимальное значение исходной концентрации органических загрязнений в производственных сточных водах, поступающих в пульсационный биореактор, может равняться свыше 2000 мг/л по БПК_{полн}, в то время как по реко-

мендациям [10] максимальная концентрация органических загрязнений при биологической очистке составляет 1000 - 1200 мг/л по БПК_{полн} для аэротенков-смесителей;

- Оптимальными параметрами процесса биологической очистки в пульсационном биореакторе являются: концентрация взвешенной биомассы $a_{взв}=4,2 - 4,8$ г/л, прикрепленной биомассы $a_{пр}=15$ г/м² по сухому веществу, концентрация кислорода в пульсационном биореакторе 2,5 - 3,5 мг/л, активная реакция среды рН= 6,5-8,5, температура сточной жидкости 18 - 26 °С, органическая нагрузка $(6,95 - 17,374) \cdot 10^3 \frac{\text{мг}}{\text{г} \cdot \text{сут}}$, гидравлическая нагрузка $q=41,16$ сут⁻¹.

При этом максимальный эффект очистки по БПК_{полн} составил 70 %.

- Пульсационный биореактор может применяться в качестве блока биологической очистки для локальных очистных сооружений молокоперерабатывающих предприятий;
- С целью создания благоприятных условий для протекания процесса биологической очистки в технологическую схему локальных очистных сооружений молокоперерабатывающих предприятий перед блоком биологической очистки рекомендуется включать резервуар-усреднитель.

Таким образом, в ходе проведения исследований была изучена возможность и подтверждена целесообразность применения пульсационного биореактора в качестве блока биологической очистки на локальных очистных сооружениях молокоперерабатывающих предприятий для очистки производственных сточных вод до норм сброса в городскую канализацию, были определены основные технологические параметры процесса биологической очистки, которые можно использовать при разработке технологической схемы локальной очистки, а также при проектировании биореактора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Яковчиц М.В. Методы и сооружения для очистки производственных сточных вод молокоперерабатывающих предприятий от органических загрязнений / Брестский гос. техн. ун-т. – Брест, 2003. – 20 с. – Деп. В БелИСА 9.06.03 - № Д200342 // Реф. сборник неопубликуемых работ №1(27).
2. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / Яковлев С.В., Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Калицун В.И. – М.: Стройиздат, 1996. – 591 с.
3. Реконструкция и интенсификация работы канализационных очистных сооружений / Воронов Ю.В., Саломеев В.П., Ивчатов А.Л., Побегайло Ю.П. и др. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
4. Пат. 810 ВУ, МКИ С 02F 3/10. Устройство для биологической очистки сточных вод / В.Н. Яромский, М.В. Яковчиц № u20020178; заявл. 17.06.2002; Опубл. 30.03.2003/ Гос. реестр полезн. моделей.
5. Яромский В.Н., Яковчиц М.В. Определение основных параметров биохимической очистки в пульсационных биореакторах. // Вестник Брестского государственного технического университета – Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. 2002. №2(14) – с. 55 – 56.
6. Яромский В.Н., Яковчиц М.В. Влияние режима работы пульсационного биореактора на объемный коэффициент массопередачи. // Техника и технология защиты окружающей среды: Материалы конференции / Бел. гос. технол. ун-т. – Минск, 2002. – с. 55 – 57.
7. Методика проведения технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. – М.: Стройиздат, 1971 г. – 231 с.
8. Голубовская Э.К. Биологические основы очистки воды. – М.: Высшая школа, 1978. – 271 с.
9. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
10. СНиП 2.03.04-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. - М.: Стройиздат, 1986. – 72 с.

УДК 628. 337

Яловая Н.П., Строкач П.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Электрохимические методы очистки воды, одним из которых является метод электрокоагуляции, основанный на полуреакции сорбента (гидроксида алюминия или железа) в процессе анодного растворения алюминиевых или железных электродов, относят к наиболее экологически чистым технологиям водоподготовки. Гидроксид алюминия, получаемый электрохимическим растворением металла, обладает высокой сорбционной активностью по отношению к загрязнениям воды, особенно к SiO_2 [1]. Использование данного процесса позволяет эффективно удалять из воды взвешенные и органические вещества, железо, кремний, фитопланктон, бактерии и другие загрязнения [2]. В процессе электрохимической очистки снижается содержание кислорода в воде [3], вода не обогащается растворимыми солями, так как дозируемый алюминий полностью удаляется из воды в виде гидроксида осветлением. Применение этого метода не требует высококвалифицированного обслуживания, позволяет отказаться от складских помещений и громоздкого реагентного хозяйства; его можно осуществлять в легко управляемой компактной и автоматически действующей установке (рис. 1).

В результате интенсивных исследований в последние годы метод электрокоагуляции находит все более широкое применение для очистки питьевых и сточных вод.

Целью наших исследований явилось изучение влияния физико-химических, электрических и гидродинамических факто-

ров на очистку воды методом электрокоагуляции от взвешенных веществ, железа, кислорода, кремния, фитопланктона и других загрязнений, определение основных технологических параметров процесса, а также выявление условий применения данного метода для предварительной очистки воды с минимальными расходами алюминия и электроэнергии.

Исследования проводились на воде р. Мухавец в электролизере из органического стекла вместимостью $1,5 \text{ дм}^3$. Алюминиевые аноды и катоды из нержавеющей стали собирали пакет с расстоянием между пластинами 5 мм. Площадь рабочей поверхности анодов составляла 1050 см^2 . Для изменения мутности воды готовили эталонные замутнители по стандартным методикам, изменение цветности производили почвенной вытяжкой. Концентрацию кремниевой кислоты и железа в воде регулировали введением в речную воду силиката натрия $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9 \text{ H}_2\text{O}$ («хч») и сульфата железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$ («хч»), показатели содержания фитопланктона в воде изменяли введением культуры синезеленых водорослей *Mikrocystis aeruginosa*.

Влияние величины pH на процесс удаления высокодисперсных частиц мутности, веществ, обуславливающих цветность воды, железа, кремния, кислорода и фитопланктона изучали подкислением или подщелачиванием исходной воды 0,1 н. растворами H_2SO_4 или NaOH. Водородный показатель определяли при помощи иономера И-130.2М-1. Температуру

Яловая Наталья Петровна, доцент каф. инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

Строкач Петр Павлович, к.т.н., профессор, зав. каф. инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета, Член-корреспондент Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.