

628  
Г79

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 628.356:628.336.511.512

**ГРЕБЕНЧИКОВА Ирина Александровна**

**АНАЭРОБНАЯ ОЧИСТКА  
СТОЧНОЙ ВОДЫ ГИДРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В БИОРЕАКТОРЕ  
С ИММОБИЛИЗОВАННОЙ МИКРОФЛОРОЙ**

05.21.03 –Технология и оборудование химической  
переработки биомассы дерева, химия древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2003

Работа выполнена на кафедре биотехнологии и биоэкологии  
учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет»

Научный  
руководитель кандидат технических наук, доцент  
Ручай Н.С., кафедра биотехнологии и биоэкологии  
учреждения образования «Белорусский  
государственный технологический университет»

Официальные  
оппоненты: доктор химических наук, профессор  
Зильберглейт М.А., зав. кафедрой редакционно-  
издательских технологий учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический  
университет»;

кандидат технических наук Трухачева Т.В.,  
зам. нач. научно-фармацевтического центра  
ОАО «Белмедпрепараты»

Оппонирующая организация – государственное научное учреждение  
«Институт проблем использования природных ресурсов и экологии»  
Национальной академии наук Беларуси

Защита диссертации состоится 30 июня 2003 г. в 13.30 часов на  
заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при учреждении  
образования «Белорусский государственный технологический  
университет» по адресу: 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а,  
корп. 4, ауд. 240; тел. (017) 226-14-32, тел./факс (017) 227-62-17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения  
образования «Белорусский государственный технологический  
университет»

Автореферат разослан

« 30 » мая 2003 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
канд. техн. наук



О. Я. Толкач

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В отечественной и мировой практике широко распространены аэробные методы биологической очистки сточных вод, как хорошо изученные, надежные и эффективные. Однако для аэробных технологий характерны трудно преодолимые недостатки: большие затраты энергии на аэрацию стоков; сложность очистки стоков с высоким уровнем загрязненности; образование в больших количествах трудно обезвоживаемого и не находящего применения избыточного активного ила.

Современные достижения науки и техники позволяют с высокой эффективностью использовать альтернативный анаэробный процесс обезвреживания стоков. За рубежом достигнут значительный прогресс в области разработки и практического применения анаэробных биореакторов специальной конструкции, которые обеспечивают очистку стоков в очень широком диапазоне концентраций загрязнений с высокой скоростью и эффективностью. В настоящее время анаэробные методы успешно применяют для очистки стоков различных производств.

Анаэробный процесс не требует энергетических затрат на аэрацию сточной воды, позволяет легко и эффективно очищать высококонцентрированные стоки, отличается малым приростом и легкостью обезвоживания активного ила, а также более высоким уровнем экологической чистоты производственного процесса. Это единственный способ очистки сточной воды, который позволяет частично (иногда даже полностью) компенсировать затраты, связанные с организацией этого процесса, за счет генерации биогаза, используемого в качестве энергоносителя.

Для Республики Беларусь проблема очистки производственных стоков особенно остра в связи с неблагоприятной экологической обстановкой, большим количеством предприятий, не имеющих собственных очистных сооружений, и ужесточением норм по уровню загрязненности сточных вод, сбрасываемых на городские очистные сооружения. В РБ практически не ведется активная исследовательская работа в области анаэробной очистки производственных стоков.

Анаэробные технологии обезвреживания сточных вод являются энергосберегающими, а при использовании образующегося биогаза становятся в некоторых случаях (как показывает мировая практика) экономически выгодными. Это обстоятельство наряду с другими достоинствами делает анаэробный процесс обработки сточных вод наи-

более привлекательным для промышленных предприятий Беларуси, в частности, для гидролизных заводов. Гидролизные производства отличаются большим количеством образующихся сточных вод (30-60 м<sup>3</sup> на 1 т перерабатываемой сухой древесины) с высоким уровнем загрязненности, исключаящим их сброс на городские очистные сооружения без предварительной очистки.

В связи с вышеизложенным проведение исследований, позволяющих разработать энергосберегающий технологический процесс анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства, является актуальным.

**Связь с крупными научными программами, темами.** Диссертационная работа выполнена на кафедре биотехнологии и биоэкологии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» в течение 1994-2002 гг. в рамках научно-исследовательских тем: «Разработка научных основ создания иммобилизованных систем для биохимической очистки сточных вод и технологических отходов от токсичных веществ», № гос. регистрации 1994759 (1994-1996 гг.); «Изучить механизмы специфической адсорбции, лежащие в основе иммобилизации микробных клеток на твердых поверхностях», № гос. регистрации 19971626 (1997-1998 гг.); «Разработать и внедрить в гидролизном производстве технологию анаэробной очистки сточных вод», № гос. регистрации 200148 (ГНТИ 05.01, «Промышленная биотехнология», 2000-2002 гг.)

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящей работы – разработка энергосберегающего технологического процесса локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства.

Из поставленной цели вытекает необходимость решения следующих задач:

1. Исследовать процесс иммобилизации спонтанно развивающейся в сточной воде анаэробной микрофлоры на волокнистом носителе.
2. Изучить закономерности процесса очистки сточной воды гидролизного производства спонтанно развивающейся в сточной воде анаэробной микрофлорой.
3. Изучить закономерности функционирования анаэробных биореакторов с иммобилизованной микрофлорой.
4. Разработать конструкцию высокоэффективного анаэробного биореактора для очистки стоков.
5. Разработать энергосберегающую технологию локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства.



**Объект и предмет исследования.** Объектом исследований являлась сточная вода Бобруйского РУП «Гидролизный завод». Предмет исследования – способ очистки сточной воды и аппараты для реализации данного способа.

**Методология и методы проведенного исследования.** Проведенные автором исследования базируются на методологии системного подхода к разработке технологического процесса биологической очистки сточных вод. Методика проведения исследований включала моделирование процессов биологической очистки сточной воды гидролизного производства в анаэробных биореакторах различных конструкций. В процессе экспериментальных исследований использовали современные микробиологические, биохимические, химические и физико-химические методы исследования: весовой метод определения количества иммобилизованных на носителе клеток, микроскопирование для определения характера биообрастания поверхности носителя, бихроматный экспрессный метод определения химического потребления кислорода (ХПК), экспрессный метод Кубеля для определения перманганатной окисляемости, метод Винклера для определения содержания растворенного кислорода, эбулиостатический метод определения редуцирующих сахаров, методы адсорбции и экстракции для определения лигногуминовых веществ, метод Кьельдаля для определения содержания азота, ионометрии для определения ионов хлора, метод атомно-абсорбционной спектrophотометрии для определения содержания ионов тяжелых металлов, ГЖХ-метод контроля содержания фурфурола в сточной воде.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Работа по исследованию процесса анаэробной биологической очистки сточной воды гидролизного производства проведена в Республике Беларусь впервые.

1. Получены данные об изменении состава сточной воды и глубине ее очистки при анаэробной обработке.
2. Установлены закономерности процесса биодegradации загрязнений сточной воды анаэробной микрофлорой в зависимости от технологических факторов.
3. Впервые показана возможность формирования гранулированного активного ила в процессе анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства и определены его физические характеристики.
4. Изучены закономерности функционирования биореактора с иммобилизованной микрофлорой и комбинированного биореактора с

иммобилизованной микрофлорой и гранулированной биомассой активного ила в процессе анаэробной обработки сточной воды гидролизного производства.

6. Разработана энергосберегающая технология локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства.

**Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.** В результате проведенных исследований впервые в РБ разработана технология локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства в высокоэффективном биореакторе комбинированного типа с иммобилизованной микрофлорой и гранулированной биомассой активного ила. Разработан опытно-промышленный регламент анаэробной очистки сточной воды. РУП «Медико-биотехнологический институт» разработан проект промышленной установки для Бобруйского РУП «Гидролизный завод». Разработанная технология после адаптации может быть распространена на другие предприятия биотехнологического профиля.

Экономическая целесообразность внедрения разработанной технологии подтверждена приведенным в работе расчетом. Технология обеспечивает необходимую для локальной обработки степень очистки сточной воды при снижении энергетических затрат в 1,9 раза, а также получение биогаза, используемого в качестве энергоносителя. Ожидаемый годовой экономический эффект от реализации технологии составляет 246 млн. руб.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Анаэробная обработка сточной воды гидролизного производства в условиях спонтанного развития микрофлоры обеспечивает снижение уровня загрязненности по ХПК на 80-90 % с одновременным удалением из сточной воды тяжелых металлов на 80-90 %.

2. Закономерности процесса очистки сточной воды иммобилизованной анаэробной микрофлорой.

3. Анаэробная микрофлора, спонтанно развивающаяся в сточной воде гидролизного производства, способна к образованию гранулированного активного ила.

4. Конструкция комбинированного биореактора с иммобилизованной микрофлорой и гранулированной биомассой активного ила обеспечивает очистку сточной воды со снижением ХПК на 70 % при нагрузке по органическим веществам 11-14 кгХПК/м<sup>3</sup>·сут. и времени пребывания сточной воды в биореакторе 12-15 часов.

5. Энергосберегающая технология локальной анаэробной очистки стоков гидролизного производства.

**Личный вклад соискателя.** Диссертант лично проводила изучение научно-технической литературы по теме работы, принимала непосредственное участие в получении экспериментальных данных, составляющих основу диссертации, их анализе, обобщении и изложении материала настоящей работы. Соавторами публикаций соискателя являются сотрудники кафедры биотехнологии и биоэкологии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», а также отдельные специалисты Бобруйского РУП «Гидролизный завод» и концерна «Белбиофарм».

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы доложены на международных научно-технических конференциях «Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химико-лесном комплексе» (г. Минск, 1997 г.); «Технические вузы – республике» (г. Минск, 1997 г.); Международной конференции «Проблемы микробиологии и биотехнологии» (г. Минск, 1998 г.); международных научно-технических конференциях «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов» (г. Минск, 2000 г.); «Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов» (г. Минск, 2001 г.); «Техника и технология защиты окружающей среды» (г. Минск, 2002 г.); «Новые технологии в химической промышленности» (г. Минск, 2002 г.); а также ежегодных научно-технических конференциях Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, 1995-1998 гг.). Диссертационная работа доложена на расширенном заседании кафедры химической переработки древесины учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, 2003 г.

**Опубликованность результатов.** По материалам диссертации опубликовано 6 статей и 8 материалов различных конференций. Общее количество страниц опубликованных материалов – 52.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, обзора литературы, описания объектов и методов исследований, экспериментальной части (3 главы), технологической части, заключения, списка использованных источников, приложений.

Работа изложена на 122 страницах, содержит 9 таблиц, 29 рисунков, 3 приложения и 197 литературных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 диссертационной работы является обзором литературы и состоит из 7 разделов, в которых приведены сведения об использовании биосистем с иммобилизованными микроорганизмами в практике очистки стоков, основных этапах анаэробной биodeградации загрязнений сточных вод, теоретических основах и практических методах удержания микробной биомассы в биореакторах, проблемах и перспективах очистки стоков в анаэробных условиях.

В главе 2 дана общая характеристика объектов и методов исследования.

Объектом исследования являлись производственные сточные воды Бобруйского РУП «Гидролизный завод»; имеющие уровень загрязненности по ХПК 4500-15000 мгО<sub>2</sub>/л, рН 4,5-4,8, температуру 35-37°С.

В качестве носителей для иммобилизации спонтанно развивающейся в сточной воде анаэробной микрофлоры исследованы два вида синтетического полимерного волокна: полиакрилонитрильное (нитрон «алый-201») и полиамидное (насадка «ВИЯ» (ТУ 99-59-90)).

Динамику процесса сорбционной иммобилизации анаэробной микрофлоры на носителе исследовали в ходе 60-суточного эксперимента, используя батарею из 10 герметизированных биореакторов с фиксированной насадкой, автономно функционирующих в мезофильном режиме (30°С) в идентичных условиях. Объем каждого биореактора 0,5 л, плотность загрузки аппаратов носителем (насадка «ВИЯ») – 12 г/л. Биореакторы функционировали одновременно в полунепрерывном режиме с регулярной порционной подачей исходной сточной воды в количестве, соответствующем удельной скорости протока жидкости через биореактор 0,005-0,010 ч<sup>-1</sup>. Количество иммобилизованной микрофлоры определяли весовым методом, ее активность оценивали по снижению величины ХПК сточной воды, образованию и потреблению летучих жирных кислот (ЛЖК).

Описанную выше батарею биореакторов использовали также при исследовании влияния величины рН сточной воды, температуры процесса, плотности загрузки биореактора волокнистым носителем на эффективность функционирования иммобилизованной микрофлоры.

Непрерывный процесс очистки сточной воды моделировали в анаэробных биореакторах с фиксированной насадкой и в биореакторе



комбинированного типа с иммобилизованной микрофлорой и гранулированной биомассой активного ила.

Биореактор комбинированного типа представляет собой цилиндрический аппарат объемом 2,5 л с внутренним диаметром 86 мм и высотой 430 мм. В верхней части аппарата расположен слой насадки (волокно «ВИЯ», закрепленное в металлическом каркасе), занимающий 36 % от общего объема биореактора при плотности упаковки насадки в слое 13 г/л и размещении волокна вертикальными слоями. Верхняя часть аппарата функционирует как биореактор с иммобилизованной на фиксированной насадке микрофлорой. Одновременно насадка выполняет функции газоилоотделителя. Нижняя часть аппарата предназначена для самопроизвольного формирования хлопьев и гранул анаэробного ила и выполняет функции биореактора с гранулированной биомассой. Продолжительность непрерывной работы биореактора в ходе эксперимента составила более 12 месяцев.

В главе 3 представлены результаты исследований процесса очистки сточной воды в анаэробных условиях.

При естественном накоплении микроорганизмов-деструкторов с иммобилизацией их на волокнистом носителе процесс очистки в анаэробных условиях стабилизируется через 35–40 суток.

Для иммобилизации спонтанно развивающейся в сточной воде микрофлоры в анаэробном биореакторе в качестве носителя целесообразно использовать полиамидное волокно в виде насадки «ВИЯ», которое отличается высокой сорбционной емкостью по микробным клеткам и обеспечивает высокую удельную производительность биореактора по деструктируемым загрязнениям (7,6 кгХПК/м<sup>3</sup>·сут.).

Количество клеток микроорганизмов, сорбированных на поверхности насадки «ВИЯ», через 45 суток эксплуатации биореакторов достигает величины 0,1 г по абсолютно сухой биомассе (АСБ) на 1 г носителя (рис. 1). Сорбированные микробные клетки обладают высокой деструктивной способностью, о чем свидетельствует снижение уровня загрязненности сточной воды по ХПК. Интенсивное снижение содержания летучих жирных кислот указывает на функционирование ацетогенной и метаногенной микрофлоры, обеспечивающей глубокую деструкцию загрязнений, сопровождающуюся повышением величины рН среды. После 12 месяцев эксплуатации биореактора толщина сформировавшейся на волокнах носителя биопленки достигла 20 мкм, емкость носителя по микробным клеткам составила около 0,6 г АСБ на 1 г волокна.

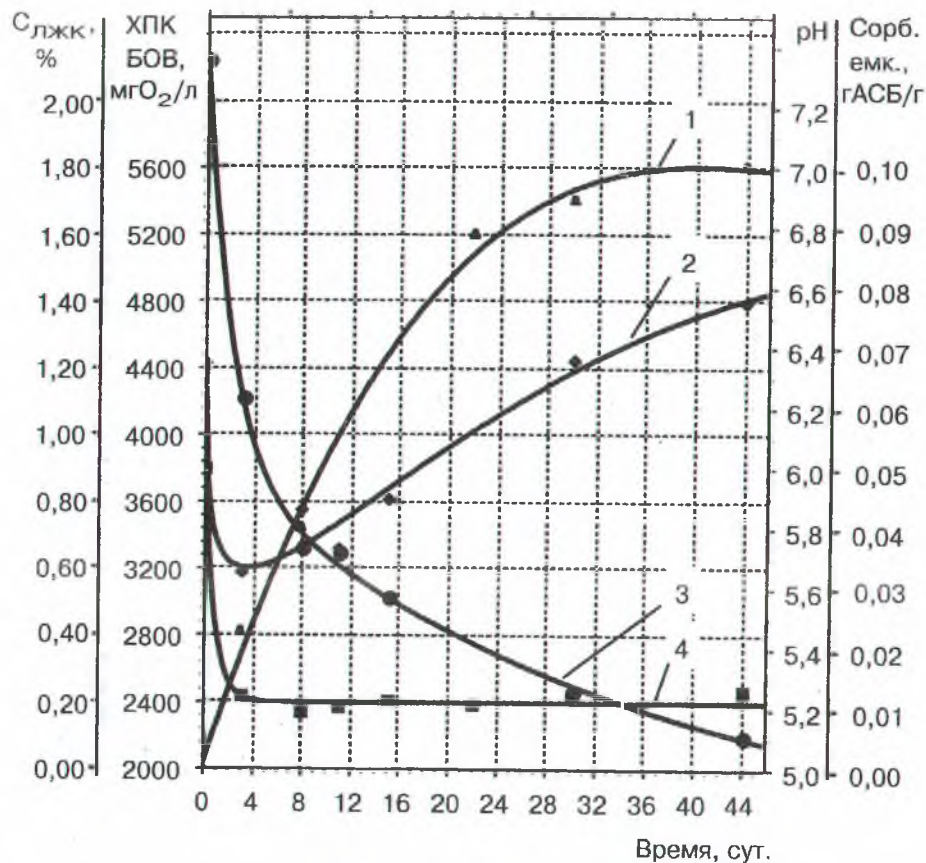


Рис. 1. Динамика формирования сорбированного слоя клеток микроорганизмов на поверхности носителя:

1 — сорбционная емкость; 2 — pH; 3 — ХПК биологически очищенной воды (БОВ); 4 — содержание ЛЖК

Для микрофлоры, сформировавшейся в нейтрализованной до pH 6,0-6,5 сточной воде, характерна высокая скорость деструкции загрязнений при исследованных температурах (30-50°C) с резким снижением величины ХПК сточной воды на 40-60% в первые сутки (рис. 2).

При анаэробной обработке натуральной сточной воды (pH 4,5-4,8) процесс биodeградации загрязнений длится около 30 сут., причем в первые двое суток величина ХПК снижается не более чем на 25% от исходного уровня.

Анаэробная биodeградация загрязнений протекает с максимальной скоростью при температуре 40°C. Термофильная микрофлора

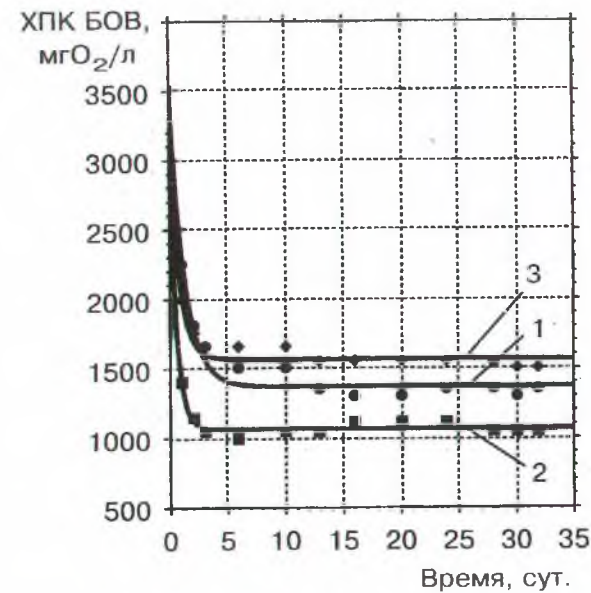


Рис. 2. Эффективность деструкции загрязнений иммобилизованной анаэробной микрофлорой в нейтрализованной сточной воде:

1 — температура процесса 30°C;  
2 — температура процесса 40°C;  
3 — температура процесса 50°C

(50°C) отличается невысокой эффективностью деструкции загрязнений, что объясняется ее меньшим видовым разнообразием. Микрофлора, развивающаяся при 30°C, по своей активности занимает промежуточное положение.

Таким образом, локальная очистка сточной воды гидролизного производства может быть осуществлена в мезофильных условиях (30°C) после предварительной нейтрализации стоков до величины pH 6,0-6,5.

В главе 4 приведены результаты исследования непрерывного процесса анаэробной очистки сточной воды в биореакторе с иммобилизованной на фиксированной насадке микрофлорой.

Эффективное функционирование биореактора с иммобилизованной микрофлорой (рис. 3) обеспечивается при плотности загрузки аппарата носителем 10-15 г/л и упорядоченном расположении его вертикальными слоями, способствующем выходу биогаза из реакционной зоны. Увеличение плотности загрузки до 18 г/л повышает степень очистки сточной воды, но несколько ухудшает гидродинамическую обстановку в биореакторе. Дальнейшее повышение плотности загрузки до 25 г/л вызывает неоднозначный отклик биосистемы: при малых скоростях протока сточной воды через биореактор эффективность очистки невысокая, при больших — возрастает. Это явление связано с нарушением массообмена в биореакторе вследствие скопления биогаза в реакционном пространстве, что обусловлено неупорядоченным расположением носителя в аппарате и высокой плотно-



стью его загрузки. Высокая скорость протока жидкости через биореактор способствует интенсивному удалению пузырьков биогаза из реакционной зоны и улучшению массообмена, что обеспечивает более высокую эффективность очистки сточной воды.

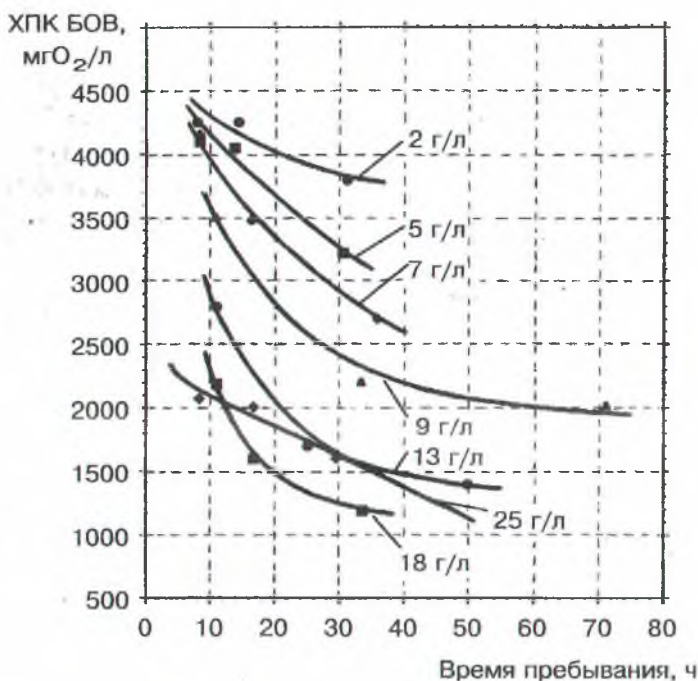


Рис. 3. Эффективность анаэробной очистки сточной воды при различной плотности загрузки биореакторов носителем

Установлено, что при двухступенчатой реализации анаэробного процесса около 95 % загрязнений (по ХПК) деструктируется микрофлорой биореактора первой ступени. Биореактор второй ступени повышает эффективность очистки сточной воды лишь на 3-5 % абсолютных. Это позволяет сделать вывод о целесообразности реализации процесса анаэробной очистки стоков в одну ступень.

В табл. 1 представлены данные по составу биологически очищенной воды, полученной при достижении максимальной степени очистки (90 % по ХПК) стока гидролизного производства в анаэробном биореакторе с иммобилизованной микрофлорой. Как следует из таблицы, сухие и взвешенные вещества БОВ имеют высокую зольность, что свидетельствует о высокой степени биodeградации органических веществ.

Состав сточной воды гидролизного производства  
до и после анаэробной очистки

Показатели	Исходная сточная вода	БОВ после анаэробной очистки	Требуемый уровень очистки стока
ХПК, мгО <sub>2</sub> /л	10800	1100	1500*
БПК <sub>5</sub> ***, мгО <sub>2</sub> /л	4220	335	800*
Редуцирующие вещества, %	0,08	отсутствие	—**
Лигноуминовые вещества, мг/л	600	450	—**
pH	6,5	8,0	6,5-9,0
Взвешенные вещества, мг/л	2130	80	400*
в т.ч. органические	1880	20	
неорганические	250	60	
Сухие вещества, мг/л	6900	2400	—**
в т.ч. органические	4340	910	
неорганические	2560	1490	
Фурфурол, мг/л	20	отсутствие	—*
Сульфаты, мг/л	1750	140	600*
Хлориды, мг/л	390	195	400*
Фосфор (в пересчете на Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> ), мг/л	100	10	10*
Азот общий, мг/л	500	10	—**
Азот аминокислот, мг/л	30,0	0,6	—**
Аммиак, мг/л	2,7	отсутствие	22*
Нитриты, мг/л	1,0	следы	—**
Нитраты, мг/л	5,0	отсутствие	—**

Примечания: \* – не более указанного значения;  
\*\* – показатель не регламентируется;  
\*\*\* – биологическое потребление кислорода.

Анаэробная обработка сточной воды в биореакторе с иммобилизованной микрофлорой приводит к значительному снижению содержания ионов тяжелых металлов (меди, железа, свинца, кадмия, никеля, цинка) и обеспечивает предварительную очистку сильно загрязненного стока до уровня, позволяющего осуществить сброс сточной воды на городские очистные сооружения.

Глава 5 содержит сведения по очистке сточной воды в комбинированном биореакторе с иммобилизованной микрофлорой и гранулированной биомассой активного ила.



Исходя из современных теоретических представлений, сточная вода гидролизного производства должна быть благоприятной средой для формирования гранулированного активного ила, так как содержит способствующие этому процессу углеводы, летучие органические кислоты и катионы кальция.

При моделировании процесса очистки сточной воды в комбинированном биореакторе засев аппарата инокулятом не производили, создавая условия для естественного образования хлопьев и гранул активного ила из спонтанно развивающейся микрофлоры. Лабораторный биореактор комбинированного типа функционировал в непрерывном режиме более 12 месяцев. Первые пять месяцев биореактор выдерживали при малой скорости потока ( $0,001-0,015 \text{ ч}^{-1}$ ), облегчая образование хлопьев и гранул анаэробного ила. В процессе эксплуатации биореактора степень очистки сточной воды по ХПК повышается, что связано с накоплением гранул активного ила в реакционном объеме, формированием биопленки на поверхности носителя и специализацией микрофлоры в различных зонах по высоте аппарата. Стабильный режим функционирования комбинированного биореактора был достигнут через девять месяцев эксплуатации аппарата.

Установлено, что в сточной воде гидролизного производства анаэробная микрофлора способна к образованию хлопьев и гранул. Гранулированный анаэробный ил обладает хорошими седиментационными свойствами, характеризуется низким иловым индексом ( $25-29 \text{ мл/г}$ ) и высокой линейной скоростью осаждения.

Высокая концентрация активного ила, удерживаемого в биореакторе ( $8 \text{ г АСБ/л}$  в зоне с фиксированной насадкой,  $12 \text{ г АСБ/л}$  в зоне с гранулированным активным илом), обусловила снижение ХПК на  $71-73 \%$  при нагрузке по органическим веществам (ОВ)  $11-14 \text{ кгХПК/м}^3 \cdot \text{сут.}$  и времени пребывания сточной воды в биореакторе  $12-15$  часов. Удельная производительность биореактора по деструктивным загрязнениям составила  $8-10 \text{ кгХПК/м}^3 \cdot \text{сут.}$

В комбинированном биореакторе степень очистки сточной воды по ХПК  $70 \%$  достигается за время в  $1,6$  раза меньшее и при расходе носителя в  $1,7$  раза меньшем, чем в биореакторе с фиксированной насадкой (рис. 4).

В главе 6 представлены описание конструкции комбинированного биореактора, расчеты и схемы элементов конструкции аппарата, приведено описание разработанной на основании результатов проведенных исследований технологии локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства (рис. 5).

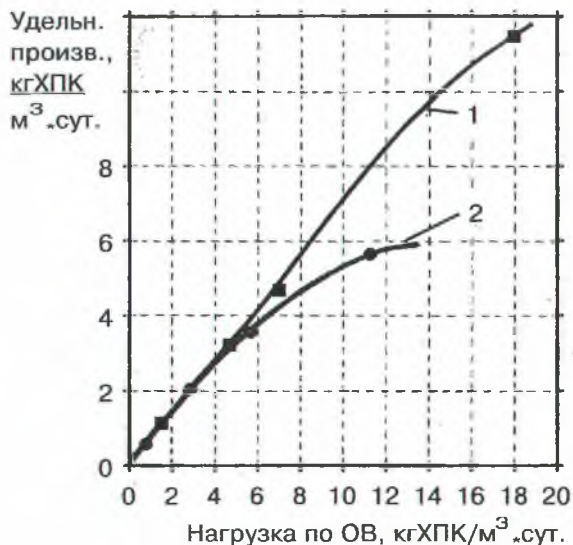


Рис. 4. Эффективность функционирования биореакторов различных типов:

- 1 – комбинированный биореактор;
- 2 – биореактор с фиксированной насадкой

Исходная сточная вода, имеющая температуру 35-37°C и рН 4,5-4,8, нейтрализуется в нейтрализаторе (3) известковым молоком (120-150 г/л СаО) при перемешивании до рН 6,5-7,0. Нейтрализованная сточная вода после осветления отстаиванием в течение 1,5-2 часов в отстойнике (4) поступает на очистку в биореактор комбинированного типа (7).

Реакционный объем биореактора функционально разделен по высоте аппарата на две части: верхняя часть (30-35 % объема) заполнена волокнистым носителем (насадка «ВИЯ») с плотностью загрузки 10-15 кг/м³ и выполняет функции анаэробного биофильтра с иммобилизованной микрофлорой; нижняя часть отделена от верхней газоотделительным устройством и обеспечивает формирование гранулированного активного ила. У днища аппарата располагается система распределения сточной воды и устройство для вывода избыточного активного ила.

Очистка сточной воды в биореакторе осуществляется за счет спонтанно развивающейся анаэробной микрофлоры.

При нормальном функционировании биореактора значение рН среды 7,0-8,0, оптимальное для развития метаногенных бактерий и обеспечивающее стабильность работы аппарата, поддерживается самопроизвольно.

Для обеспечения требуемого температурного режима процесса (не менее 30°C) предусматривается теплоизоляция биореактора и емкостных аппаратов для подготовки сточной воды к переработке

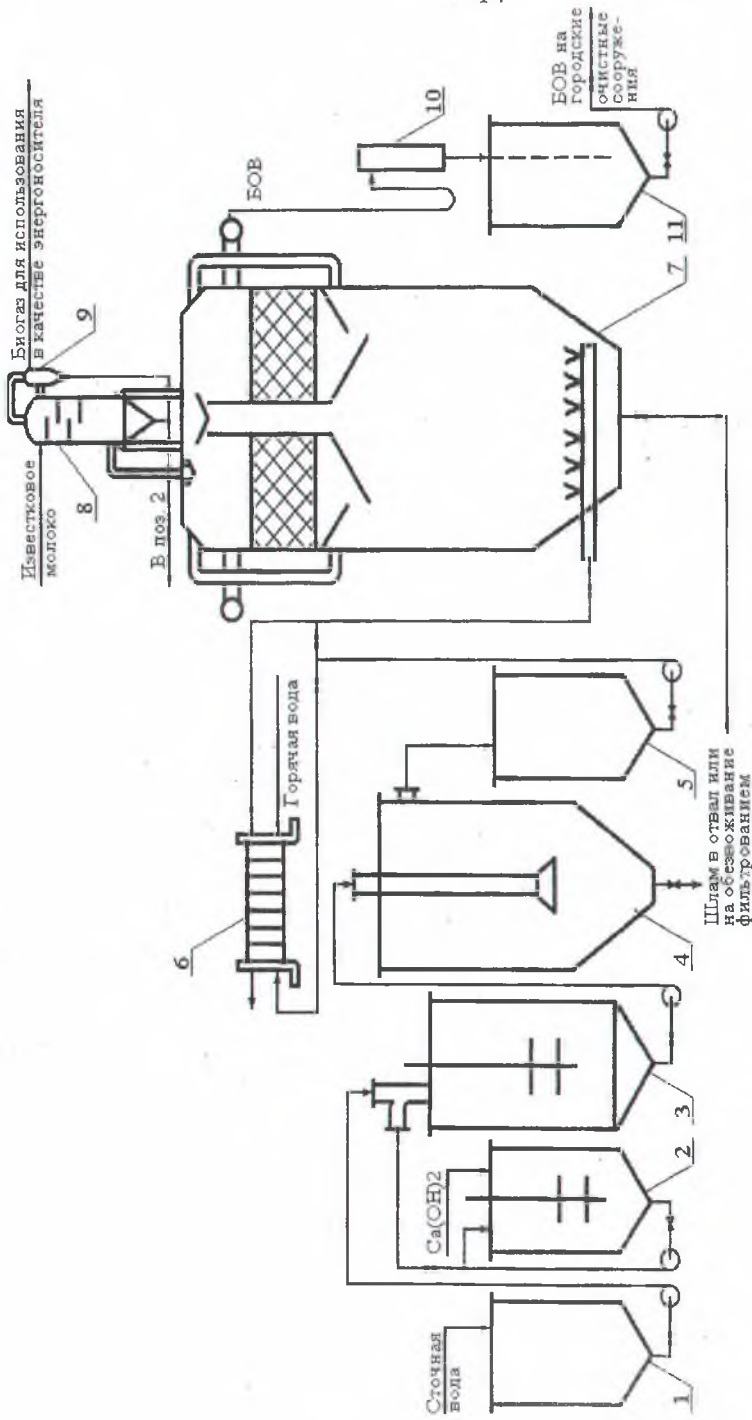


Рис. 5. Аппаратурная схема локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства: 1 — приемник сточной воды; 2 — сборник-мешалка известкового молока; 3 — нейтрализатор; 4 — вертикальный отстойник; 5 — приемник осветленной сточной воды; 6 — подогреватель стоков; 7 — биореактор; 8 — полочный скруббер; 9 — циклон-осушитель; 10 — колонка для удаления сульфидов; 11 — приемник БОВ

(сборник сточной воды, нейтрализатор, отстойник), а в холодное время года – подогрев нейтрализованного стока горячей оборотной водой в теплообменниках (6).

Ответственной процедурой является запуск биореактора, в ход которого происходит накопление микрофлоры в биореакторе, формирование биопленки на волокнистой насадке (в течение 1,5-2 месяцев и гранул активного ила в реакционной зоне (в течение 6-9 месяцев). Через 6-9 месяцев эксплуатации работа биореактора стабилизируется аппарат обеспечивает требуемую степень очистки сточной воды при нагрузке по загрязнениям 11-14 кгХПК/м<sup>3</sup>\*сут.

Содержание взвешенных веществ в очищенном стоке (30-100 мг/л) позволяет непосредственно сбрасывать его на очистные сооружения города.

Осадок из нижней части биореактора периодически удаляют и обезвоживают на фильтре-прессе либо на иловой площадке.

При очистке сточной воды, содержащей сульфаты, образуется сероводород. Удаление растворенного сероводорода из очищенной воды производят посредством контакта со стальными стружками в колонном аппарате (10) или с помощью аэрации очищенного стока.

При метановом сбраживании более 80 % энергии субстрата переходит в метан. В процессе очистки сточной воды на 1 кг деструктированных загрязнений по ХПК выделяется 0,4-0,6 м<sup>3</sup> биогаза, который накапливается в верхней части биореактора, создавая избыточное давление в аппарате 30-40 кПа. Для предотвращения коррозии коммуникаций биогаз поступает на очистку от сероводорода в полочный скруббер (8), орошаемый известковым молоком из сборника (2) проходит осушку в мультициклоне (9), отделяющем капельную влагу и направляется для использования в качестве энергоносителя.

Разработанная технология локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства является энергосберегающей т.к. обеспечивает необходимую для локальной обработки степень очистки сточной воды при низких энергетических затратах, а также получение биогаза, используемого в качестве энергоносителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований впервые в Республике Беларусь разработана энергосберегающая технология локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства с использованием высокоэффективного биореактора комбинированного типа,



которая обеспечивает снижение энергетических затрат на очистку стоков в 1,9 раза, а также получение биогаза, используемого в качестве энергоносителя [6, 11, 12, 13].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследованы закономерности анаэробного процесса обработки сточной воды, на основании которых установлено, что локальная анаэробная очистка сточной воды гидролизного производства с достижением требуемой степени удаления загрязнений (70 % по ХПК) может быть осуществлена в одну ступень в биореакторе с иммобилизованной на насадке «ВИЯ» спонтанно развивающейся в стоках микрофлорой при рН исходной сточной воды 6,0-6,5, температуре 30-40°C, плотности загрузки биореактора носителем 10-15 г/л и скорости протока жидкости через биореактор 0,04-0,06 ч<sup>-1</sup> [3, 5, 7, 8, 10, 14].

2. Показано, что анаэробная обработка сточной воды гидролизного производства в условиях спонтанного развития микрофлоры обеспечивает снижение уровня загрязненности по ХПК на 80-90 % с одновременным удалением из сточной воды тяжелых металлов на 80-90 %. Для полной очистки сточной воды необходима дополнительная обработка БОВ в аэробных условиях [1, 2, 5, 7, 8, 10, 14].

3. Впервые установлено, что анаэробная микрофлора, спонтанно развивающаяся в сточной воде гидролизного производства, способна к образованию гранулированного активного ила. Определены физические характеристики гранулированного активного ила [4, 5, 9, 10].

4. Установлены закономерности функционирования высокоэффективного анаэробного биореактора комбинированного типа, реакционный объем которого включает зону с иммобилизованной на носителе микрофлорой и не содержащую носитель зону с гранулированной биомассой активного ила. Комбинированный биореактор обеспечивает степень очистки сточной воды по ХПК 71-73 % при нагрузке по органическим веществам 11-14 кгХПК/м<sup>3</sup>·сут. и времени обработки сточной воды 12-15 часов [4, 5, 9, 10, 13].

5. По результатам исследований разработаны опытно-промышленный регламент анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства, конструкция биореактора комбинированного типа. Разработанная технология принята к реализации на Бобруйском РУП «Гидролизный завод», для которого РУП «Медико-биотехнологический институт» разработан проект промышленной установки. Ожидаемый годовой экономический эффект от реализации технологии составляет 246 млн. руб. Разработанная технология после адаптации может быть распространена на другие предприятия биотехнологического профиля.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи:

1. Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гребенчикова И.А., Гринько В.Н., Гриц Н.В. Исследование процесса очистки сточных вод иммобилизованной микрофлорой // Вестник БГУ. Сер. 2, Химия, биология, география.– 1996.– № 1.– С. 13-17.

2. Гребенчикова И.А., Хмельницкий А.Л., Маркевич Р.М., Ручай Н.С. Использование иммобилизованной микрофлоры в процессах очистки сточных вод гидролизного производства // Труды Белор. госуд. технол. ун-та. Химия и химическая технология.– 1996.– Вып. 3.– С. 53-56.

3. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Исследование процесса анаэробной детоксикации сточных вод в проточном режиме // Труды Белор. госуд. технол. ун-та. Химия и химическая технология.– 1997.– Вып. 5.– С. 44-47.

4. Гребенчикова И.А., Маркевич Р.М., Костюк С.Д., Ручай Н.С. Анаэробная детоксикация сточных вод в биореакторе интенсивного массообмена // Труды Белор. госуд. технол. ун-та. Химия и химическая технология.– 1998.– Вып. 6.– С. 184-187.

5. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гриц Н.В. Очистка сточной воды гидролизного производства в анаэробных биореакторах // Биотехнология.– 2002.– № 4.– С. 70-79.

6. Ручай Н.С., Гребенчикова И.А., Маркевич Р.М., Гриц Н.В., Дорогуш В.М., Янковский Ч.Ю. Технология анаэробной локальной очистки сточной воды Бобруйского гидролизного завода // Материалы. Технологии. Инструменты.– 2002.– Т. 4, № 4.– С. 96-99.

### Материалы конференций:

7. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Васильева О.С., Гриц Н.В. Технологические аспекты анаэробной детоксикации сточных вод гидролизного производства // Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химико-лесном комплексе: Труды Междунар. научно-техн. конф., Минск, 27-28 окт. 1997 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 1997.– С. 275-278.

8. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С. Анаэробная детоксикация сточных вод гидролизных производств // Технические вузы – республика Беларусь: материалы конференции. Минск, 2002. – С. 10-12.



503ар

лике: Материалы 52-й Междунар. научно-техн. конф. проф., препод., научн. работ-в, аспирант и студ. БГПА, г. Минск, 12-22 нояб. 1997 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. политехн. акад.– Минск, 1997.– Ч. 6, С. 132.

9. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Гриц Н.В., Янковский Ч.Ю. Детоксикация сточных вод гидролизного производства в анаэробном биореакторе // Проблемы микробиологии и биотехнологии: Материалы Междунар. конф., Минск, 25-27 нояб. 1998 г. / Нац. акад. наук Беларуси. Концерн «Белбиофарм». Отд. биол. наук НАН Беларуси. Белорус. микробиол. об-во. Ин-т микробиол.– Минск, 1998.– С. 115-116.

10. Ручай Н.С., Гребенчикова И.А., Маркевич Р.М., Гриц Н.В. Очистка сточных вод в высокоэффективных анаэробных биореакторах // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы Междунар. научно-техн. конф., Минск, 9-10 нояб. 2000 г. / Мин-во образ. РБ. Концерн «Белнефтехим». Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 2000.– С. 294-297.

11. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гриц Н.В., Янковский Ч.Ю. Технология анаэробной локальной очистки сточной воды Бобруйского гидролизного завода // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов: Материалы Междунар. научно-техн. конф., Минск, 24-26 окт. 2001 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 2001.– С. 149-152.

12. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гриц Н.В. Очистка сточной воды гидролизного производства в условиях анаэробной обработки // Техника и технология защиты окружающей среды: Материалы Междунар. научно-техн. конф., Минск, 23-25 окт. 2002 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 2002.– С. 17-19.

13. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гриц Н.В. Технология анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства // Техника и технология защиты окружающей среды: Материалы Междунар. научно-техн. конф., Минск, 23-25 окт. 2002 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 2002.– С. 14-16.

14. Гребенчикова И.А., Ручай Н.С., Маркевич Р.М., Гриц Н.В. Локальная анаэробная очистка сточной воды гидролизного производства // Новые технологии в химической промышленности: Материалы Междунар. научно-техн. конф., Минск, 20-22 ноября 2002 г. / Мин-во образ. РБ, Белор. госуд. технол. ун-т.– Минск, 2002.– С. 150-153.

## РЕЗЮМЕ

ГРЕБЕНЧИКОВА Ирина Александровна  
ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛЬНОЙ АНАЭРОБНОЙ ОЧИСТКИ  
СТОЧНОЙ ВОДЫ ГИДРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: сточная вода, гидролизное производство, анаэробные условия, спонтанно развивающаяся микрофлора, волокнистый носитель, иммобилизация, гранулированный активный ил, биореактор с фиксированной насадкой, комбинированный биореактор, биогаз, энергосберегающая технология.

Объектом исследований являлась сточная вода Бобруйского РУП «Гидролизный завод». Цель работы – разработка энергосберегающего технологического процесса локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства. В работе использованы современные микробиологические, биохимические, химические и физико-химические методы исследования; оборудование: спектрофотометр СФ-2В, хроматограф Хром-4, атомно-абсорбционный спектрофотометр С-115М-1. Исследован процесс очистки сточной воды гидролизного производства в анаэробных биореакторах с иммобилизованной на волокнистом носителе (насадке «ВИЯ») микрофлорой, спонтанно развивающейся в сточной воде. Определены режимные параметры реализации процесса: температура 35-37°C; рН исходной сточной воды 6,0-6,5; плотность загрузки биореактора носителем 10-15 г/л. Анаэробная обработка приводит к снижению уровня общей загрязненности по ХПК на 80-90 % с удалением из сточной воды тяжелых металлов на 80-90 %. Показана высокая эффективность комбинированного биореактора с иммобилизованной микрофлорой и гранулированным активным илом в сравнении с биореактором с фиксированной насадкой. Биореактор обеспечивает степень очистки стока 70 % (по ХПК) при нагрузке по загрязнению 11-14 кгХПК/м<sup>3</sup>·сут. и времени обработки 12-15 часов. Впервые в РБ разработана технология локальной анаэробной очистки сточной воды гидролизного производства с использованием высокоэффективного комбинированного биореактора. Технология обеспечивает необходимую степень очистки сточной воды при низких энергетических затратах, а также получение биогаза, используемого в качестве энергоносителя.



## РЭЗЬЮМЭ

ГРАБЕНЧЫКАВА Ірына Аляксандраўна  
ТЭХНАЛОГІЯ ЛАКАЛЬНАЙ АНАЭРОБНАЙ АЧЫСТКІ  
СЦЁКАВАЙ ВАДЫ ГІДРОЛІЗНАЙ ВЫТВОРЧАСЦІ

Ключавыя словы: сцёкавая вада, гідролізная вытворчасць, анаэробныя ўмовы, мікрафлора, якая спантанна развіваецца, валакністы носьбіт, імабілізацыя, грануляваны актыўны глей, біярэактар з фіксаваным носьбітам, камбінаваны біярэактар, біягаз, энергаашчадная тэхналогія.

Аб'ектам даследавання ў з'яўлялася сцёкавая вада Бабруйскага РУП «Гідролізны завод». Мэта работы – распрацоўка энергаашчаднага тэхналагічнага працэсу лакальнай анаэробнай ачысткі сцёкавай вады гідролізнай вытворчасці. У рабоце выкарыстаны сучасныя мікрабіялагічныя, біяхімічныя, хімічныя і фізіка-хімічныя метады даследавання; абсталяванне: спектрафотометр СФ-2В, хроматограф Хром-4, атамна-абсарбцыйны спектрафотометр С-115М-1. Даследаваны працэс ачысткі сцёкавай вады гідролізнай вытворчасці ў анаэробных біярэактарах з імабілізаванай на валакністым носьбіце (насадцы «ВІЯ») мікрафлорай, якая спантанна развіваецца ў сцёкавай вадзе. Вызначаны рэжымныя параметры рэалізацыі працэсу: тэмпература 35-37°C; рН зыходняй сцёкавай вады 6,0-6,5; шчыльнасць загрузкі біярэактара носьбітам 10-15 г/л. Анаэробная апрацоўка прыводзіць да зніжэння ўзроўню агульнай забруджанасці па ХСК на 80-90 % з выдаленнем са сцёкавай вады цяжкіх металаў на 80-90 %. Паказана высокая эфектыўнасць камбінаванага біярэактара з імабілізаванай мікрафлорай і грануляваным актыўным глеем у параўнанні з біярэактарам з фіксаваным носьбітам. Біярэактар забяспечвае ступень ачысткі сцёка 70 % (па ХПК) пры нагрузцы па забруджванню 11-14 кгХПК/м<sup>3</sup>·сут. і працягласці апрацоўкі 12-15 гадзін. Упершыню ў РБ распрацавана тэхналогія лакальнай анаэробнай ачысткі сцёкавай вады гідролізнай вытворчасці з выкарыстаннем высокаэфектыўнага камбінаванага біярэактара. Тэхналогія забяспечвае неабходную ступень ачысткі сцёкавай вады пры нізкіх энергетычных выдатках, а таксама атрыманне біягазу, які выкарыстоўваецца ў якасці энерганосьбіта.

**SUMMARY****GREBENTCHIKOVA Irina Aleksandrovna**  
**THE TECHNOLOGY OF LOCAL ANAEROBIC TREATMENT**  
**OF HYDROLYSIS PRODUCTION WASTEWATER**

Key words: wastewater, hydrolysis production, anaerobic conditions, spontaneously growing microflora, fibrous carrier, immobilization, granular activated sludge, bioreactor with fixed carrier, combined bioreactor, biogas, energy saving technology.

The object of investigations was Bobruysk hydrolysis plant wastewater. The purpose of the study was to develop the energy saving technological process of local anaerobic treatment of hydrolysis production wastewater. Modern microbiological, biochemical, chemical and physico-chemical methods were applied. The following instruments were used: spectrophotometer СФ-2В, chromatograph Хром-4, atomic absorption spectrophotometer C-115M-1. The process of hydrolysis production wastewater treatment using anaerobic bioreactors with spontaneously growing microflora immobilized on fibrous carrier «ВЛЯ» was investigated. The processing parameters were determined: temperature 35-37°C; initial wastewater pH 6,0-6,5; carrier loading density in the bioreactor 10-15 g/l. Anaerobic treatment leads to total pollution level decrease by about 80-90 % with elimination of approximately 80-90 % of heavy metals. High efficiency of combined bioreactor with immobilized microflora and granular activated sludge in comparison to bioreactor with fixed carrier was shown. The bioreactor ensures 70 % degree (measured by COD) of wastewater purification under organic loading rates 11-14 kgCOD/m<sup>3</sup>·day and hydraulic retention times 12-15 hours. For the first time in Belarus the technology of local anaerobic treatment of hydrolysis production wastewater using highly efficient combined bioreactor was developed. The technology provides the necessary level of wastewater purification with low energy consumption and generates biogas as the energy source.

**Гребенчикова Ирина Александровна**

**АНАЭРОБНАЯ ОЧИСТКА  
СТОЧНОЙ ВОДЫ ГИДРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В БИОРЕАКТОРЕ С ИММОБИЛИЗОВАННОЙ МИКРОФЛОРОЙ**

Подписано в печать 27.05.2003. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Усл. кр.-отг. 1,4. Уч.-изд. л. 1,2.

Тираж 80 экз. Заказ № 242.

Учреждение образования

„Белорусский государственный технологический университет“  
220050, Минск, Свердлова, 13а. Лицензия ЛВ №276 от 15.04.03.

Отпечатано на ротапринте учреждения образования

„Белорусский государственный технологический университет“  
220050, Минск, Свердлова, 13.