



**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
ПРИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД**

М.А. Безматерных, И.С. Селезнева

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел./факс: (343) 374-39-05, тел.: (343) 375-44-20
E-mail: max6669@rambler.ru, i.s.selezneva@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 18.06.15 Заключение совета экспертов: 21.06.15 Принято к публикации: 24.06.15

В статье рассмотрены экологические аспекты очистки промышленных и бытовых сточных вод и утилизации образующихся при этом илистых осадков. Проведено сравнение аэробных и анаэробных методов очистки сточных вод. Дана характеристика основных групп микроорганизмов, используемых в биологической очистке, и особенности их метаболизма. Установлено, что объем выделяющегося биогаза полностью может обеспечить собственные нужды очистных сооружений. Разработаны дополнительные этапы обезвреживания многотоннажных осадков анаэробным методом.

Ключевые слова: биологическая очистка сточных вод, аэробные методы очистки, анаэробное сбраживание, илистые осадки, микроорганизмы, метаболизм, биогаз.

**ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY
IN BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT**

M.A. Bezmaternikh, I.S. Selezneva

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel./fax: (343) 374-39-05, tel.: (343) 375-44-20
E-mail: max6669@rambler.ru, i.s.selezneva@urfu.ru

Referred: 18.06.15 Expertise: 21.06.15 Accepted: 24.06.15

The article deals with the environmental aspects of purification of industrial and household wastewater and utilization of the silty sediments. The comparison of aerobic and anaerobic wastewater treatment methods has been done. Characteristic of the main groups of microorganisms used in the biological purification and features of their metabolism are described. It has been found that the amount of released biogas can fully meet the treatment facilities' own needs. An additional step of neutralization of large-tonnage silty sediments by the anaerobic method has been developed.

Keywords: biological wastewater treatment, aerobic treatment methods, anaerobic digestion, silty sediments, microorganisms, metabolism, biogas.



Максим Алексеевич
Безматерных
Maxim A. Bezmaternikh

Сведения об авторе: канд. хим. наук, доцент кафедры технологии органического синтеза, зам. директора по образованию Химико-технологического института УрФУ.
Образование: Уральский политехнический институт (1993).
Область научных интересов: экобиотехнология, органический синтез, энергосбережение.
Публикации: 102, 10 учебных пособий.

Information about the author: Associate professor, Candidate of chemical science, education vice-director of Institute of Chemical Technology Ural Federal University.

Education: Ural Polytechnic Institute (1993).
Research area: ecobiotechnology, organic synthesis, energy saving.
Publications: 102, 10 training aids.



Ирина Станиславовна
Селезнева
Irina S. Selezneva

Сведения об авторе: канд. хим. наук, доцент кафедры технологии органического синтеза Химико-технологического института УрФУ.

Почетный работник высшей школы.

Образование: Уральский политехнический институт (1976).
Область научных интересов: биологическая очистка сточных вод, энергосбережение в химической промышленности, охрана окружающей среды, органический синтез, энергосбережение.
Публикации: 152, 15 учебных пособий.

Information about the author: Associate professor, Candidate of chemical science, Institute of Chemical Technology Ural Federal University.

Honorary Worker of Higher School.

Education: Ural Polytechnic Institute (1976).
Research area: biological wastewater treatment, organic synthesis, energy saving.
Publications: 152, 15 training aids.

Введение

Вода – это важнейший природный ресурс, необходимый для жизнеобеспечения человека. Загрязнение воды наиболее жестко сказывается на здоровье людей. Проблема очистки сточных вод очень остро стоит на предприятиях химической, металлургической, энергетической, добывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, а также на предприятиях, связанных с сельскохозяйственной деятельностью, так как на промышленных площадках предприятий не предусмотрена комплексная очистка, способная очищать стоки до нормативов объектов рыбохозяйственного назначения, что позволило бы осуществлять сброс. Предприятия проводят лишь предварительную очистку стоков: нейтрализацию, осаждение. Затем стоки сбрасываются в общезаводской хозяйственно-бытовой коллектор. Процентное содержание стоков, поступающих в городскую станцию на очистку, составляет 50:50 промышленных к хозяйственно-бытовым, в которые входят атмосферные. Процентное соотношение может меняться.

Сточные воды, содержащие целый ряд органических и неорганических загрязнителей, негативно влияют на окружающую среду и нуждаются в комплексной очистке. Хотя реки и проточные водоемы обладают способностью к самоочищению, но процесс протекает медленно, а нагрузка стоков и мощности предприятий постоянно увеличиваются. Поэтому на предприятиях ведутся активные работы по

предварительной очистке сточных вод, а на городских очистных сооружениях проводится доочистка. Таким образом, только стоки и шламы, прошедшие все этапы очистки и отвечающие требованиям природоохранного законодательства, сбрасываются в водоем и на соответствующие площадки.

Методы очистки сточных вод

Методы очистки сточных вод разделяют на механические, химические, физико-химические и биологические. Выбор того или иного метода очистки или комплекса методов в каждом конкретном случае определяется характером загрязнения и степенью вредности примесей, содержащихся в сточных водах.

К механическим методам относится очистка сточных вод в песколовках.

Песколовка – сооружение механической очистки, рассчитанное на отделение сточной воды от минеральных примесей. Органические же примеси в песколовках не задерживаются из-за высокой скорости течения жидкости. Широкое распространение для механической очистки получили горизонтальные, горизонтальные с круговым движением воды, вертикальные, аэрируемые и тангенциальные песколовки.

В аэрируемых песколовках выпадает больше осадка, выше его зольность и, кроме того, в нем содержатся мелкие фракции песка, не задерживаемые в горизонтальных песколовках.



К химическим методам относится обработка реагентами, которые вступают в реакцию с растворенными в сточных водах веществами. При этом образуются нетоксичные вещества, растворимые соединения переходят в нерастворимые и выпадают в осадок. Этот метод очистки требует расхода большого количества реагентов и последующей дополнительной очистки другими методами.

Физико-химическая очистка сточных вод заключается в изменении физического состояния загрязнений, что способствует их удалению из сточных вод. К ним относятся коагуляция, флотация, эвапорация, а также ионообменные методы. Эти методы характеризуются высокой эффективностью, но являются энергоемкими и требуют применения дорогостоящих реагентов.

К биологическим методам относятся аэробные и анаэробные методы с участием организмов разных морфологических групп.

Аэробные методы очистки сточных вод основаны на использовании закономерностей биохимического и физиологического самоочищения рек и других водоемов. Есть несколько типов биологических устройств по очистке сточных вод: биофильтры, биологические пруды и аэротенки [1].

Наиболее широко используются аэротенки, в которых очищающим началом является активный ил из бактерий и микроскопических животных (колоники, черви и водные клещи). Все эти живые существа бурно развиваются в аэротенках, чему способствуют органические вещества сточных вод и избыток кислорода, поступающего в сооружение потоком подаваемого воздуха. Бактерии склеиваются в хлопья и выделяют ферменты, минерализующие органические загрязнения. Инфузории, жгутиковые, амёбы, колоники и другие мельчайшие животные, пожирая бактерии, не слипающиеся в хлопья, омолаживают бактериальную массу ила.

Конструкции аэротенков [1] отличаются как по способу подачи сточной воды и активного ила (вытеснители, смесители и смешанного типа), так и по способу аэрации (обеспечения процесса очистки кислородом пневматическим или механическим способом).

Аэробные методы дают хорошие результаты только при очистке коммунально-бытовых стоков. Для эффективной жизнедеятельности аэробных микроорганизмов активного ила необходима постоянная подача значительного количества кислорода воздуха, интенсивное перемешивание, что требует высоких энергозатрат. Микроорганизмы потребляют только растворившийся в воде кислород. Для повышения степени растворения необходимо использование эффективного дополнительного оборудования (мелкопузырчатых аэраторов). При этом возникают дополнительные затраты, обусловленные установкой, эксплуатацией и очисткой аэраторов. Вторая проблема связана с образованием большого количества биомассы в виде активного ила, часть которого реаэрируется и используется повторно в аэротенках. Большая часть

избыточного активного ила требует утилизации, что представляет собой значительную экологическую проблему для близлежащих территорий.

Анаэробные методы могут быть использованы как для очистки сточных вод, так и для утилизации осадков, полученных при аэробном способе. К преимуществам этих методов следует отнести минимальное количество необходимого оборудования и низкий уровень эксплуатационных расходов. Следует отметить, что при анаэробном методе не происходит быстрого роста биомассы и, как следствие, образования большого количества осадка, требующего значительных земельных площадей для его хранения и дальнейшей утилизации. Кроме того, при анаэробном процессе в качестве продукта жизнедеятельности выделяется биогаз, который можно использовать как источник для получения тепловой энергии с целью обеспечения собственных нужд станций биологической очистки для процесса очистки сточных вод и утилизации осадков.

Таким образом, анаэробный способ очищения сточных вод является на сегодняшний день наиболее перспективным способом очистки вод с высокой концентрацией органических соединений, бытовых стоков, а также утилизации осадков.

Экологические аспекты при биологической очистке сточных вод

В результате биологической очистки сточных вод в качестве отходов, представляющих угрозу для окружающей среды, образуются иловые осадки. Часть из них может использоваться повторно для процесса очистки сточных вод, в то время как большая часть не используется и должна быть удалена за пределы очистных сооружений. В большинстве станций биологической очистки осадки вывозятся на иловые площадки для естественного обезвоживания.

На иловых площадках ил должен быть подсушен в среднем до влажности 75%, вследствие чего его объем уменьшается в 5 раз. Иловые площадки устраивают на естественном или искусственном основании. Если почва хорошо фильтрует воду (песок и супесь) и грунтовые воды находятся на большой глубине, иловые площадки устраивают на естественных грунтах. Если грунтовые воды залегают неглубоко, для отвода профильтровавшейся воды необходим специальный дренаж. Если же и при хороших грунтах не исключается опасность загрязнения грунтовой воды, площадку необходимо устраивать на искусственном основании, препятствующем попаданию профильтровавшейся загрязненной воды в грунтовой поток.

Следовательно, иловые площадки являются значительной экологической проблемой, в том числе и для городов Свердловской области, как в настоящее время, так и в долгосрочной перспективе. В силу того, что большинство иловых площадок уже заполнено, вода и осадок из них загрязняют окружающую среду, либо же



избыток воды и осадка возвращается на очистные станции, таким образом, увеличивается нагрузка на очистные сооружения. Кроме того, в долгосрочной перспективе просачивание иловой воды в грунт может привести к загрязнению подземных вод и водотоков.

Таким образом, обезвоживание осадков на иловых площадках представляет реальную угрозу вторичного загрязнения окружающей среды, требует значительных капитальных затрат и больших площадей земельных угодий под их размещение и хранение. Поэтому в настоящее время применяют механическое обезвоживание осадков на вакуум-фильтрах, вибрационных фильтрах, центрифугах и фильтр-прессах. Тем не менее, дальнейшее полезное использование этих обезвоженных осадков не представляется возможным.

Однако в качестве более перспективного и экологически безопасного способа утилизации иловых осадков можно предложить применение процессов их анаэробного сбраживания. В этом случае в конечном итоге резко сокращается количество образующегося осадка, изменяется его состав и структура, что способствует его более легкому обезвоживанию и дальнейшему использованию в качестве удобрений. Тем самым снижается опасность проникновения загрязняющих веществ и патогенных микроорганизмов в подземные и грунтовые воды, снижается площадь земельных угодий, выводимых из хозяйственного оборота.

Характеристика анаэробных организмов и их метаболизм

Микроорганизмы, осуществляющие анаэробные процессы в ходе очистки сточных вод и утилизации осадков, представляют собой симбиотическое сообщество и функционируют как саморегулирующаяся система, поддерживающая значения pH окислительно-восстановительного потенциала, термодинамическое равновесие системы и обеспечивающая стабильность сбраживания органических субстратов-загрязнителей [2].

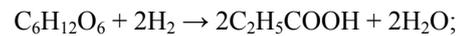
Отдельные группы органических загрязнений (углеводы, протеины, липиды/ жиры) в процессе гидролиза преобразуются сначала в соответствующие мономеры (сахара, аминокислоты, жирные кислоты). Далее эти мономеры в ходе ферментативного разложения (ацетогенеза) преобразуются в короткоцепочечные органические кислоты, спирты и альдегиды, которые затем окисляются дальше в уксусную кислоту, что связано с получением водорода. Только после этого доходит очередь до образования метана на этапе метаногенеза. Наряду с метаном в качестве побочного продукта образуется углекислый газ (CO₂).

В анаэробных процессах принимают участие три группы микроорганизмов. Первая группа – гидролитические ацидогенные бактерии: протеолитические – *Eubacterium*, целлюлолитические – *Clostridium*, *Acetobacterium*, облигатные анаэробы – *Bacteroides*, *Bifidobacteria* и факультативные анаэробы – *Streptococcus* и *Enterobacteriaceae*. Они обеспечива-

ют начальный гидролиз высокомолекулярных субстратов и сбраживание промежуточных метаболитов до низкомолекулярных органических соединений. Примеры некоторых реакций:

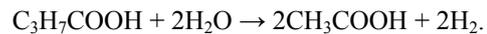


при значительном увеличении количества водорода и уксусной кислоты включаются альтернативные пути конверсии биомассы с образованием пропионовой и масляной кислот:



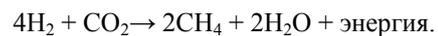
Гидролитические бактерии продуцируют видоспецифичные экзоферменты – протеазы, липазы, амилазы, целлюлазы и пектиназы для регуляции метаболических превращений.

Вторая группа представляет собой гетероацетогенные бактерии: *Synthrobacter wolinii* (граммотрицательная палочка) и *Synthrophomonas wolfii* (нефототрофная бактерия). Эта группа бактерий разлагает низкомолекулярные органические кислоты и некоторые спирты с образованием уксусной кислоты и водорода:



Третью группу составляют метаногенные бактерии, продуцирующие метан, в нее входят представители родов *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanococcus*, *Methanosarctna* и *Methanothrix*.

Третья группа делится на две подгруппы. К первой подгруппе относятся хемолитотрофные бактерии, которые превращают водород и диоксид углерода в метан, используя газообразный водород в качестве донора электронов:



Эта реакция термодинамически выгодна, так как связана с продуцированием энергии в виде одной молекулы АТФ из АДФ.

Микроорганизмы второй подгруппы относятся к хемоорганотрофам, перерабатывающим метанол, муравьиную и уксусную кислоты в метан:



В ходе последнего процесса выделяется только 0,25 моль АТФ в расчете на один моль кислоты, поэтому он термодинамически менее выгоден [3].

Все перечисленные реакции являются источниками энергии для метанообразующих бактерий, и каждая из них представляет собой серию последовательных ферментативных превращений исходного вещества. В процессе метанообразования принимает



участие витамин В₁₂, которому принадлежит основная роль в переносе водорода в энергетических окислительно-восстановительных реакциях у метанообразующих бактерий.

В результате процесса анаэробного сбраживания образуется целый ряд органических и неорганических соединений различных классов:

- органические кислоты: уксусная, пропионовая, масляная, капроновая, муравьиная, молочная, янтарная;
- спирты и кетон: метанол, этанол, изопропиловый спирт, бутанол, глицерин, ацетон;
- витамины: рибофлавин (В₂), цианкобаламин (В₁₂);
- ферменты: целлюлаза, алкогольдегидрогеназа;
- а также газообразные продукты: метан, водород, диоксид углерода.

Состав биогаза и доля метана в нем меняется в зависимости от того, какой класс органических соединений преобладает в сточной воде либо в осадках (таблица). Так, большинство углеводов разлагается легко, однако при этом образуется сравнительно небольшое количество метана. При разложении жиров и масел образуется большее количество биогаза с высоким содержанием в нем метана, однако разлагаются они очень медленно. Кроме того, жирные кислоты, образующиеся как побочные продукты при разложении жиров и масел, могут препятствовать всему процессу разложения.

Выход биогаза и доля метана в нем в зависимости от класса разлагаемых веществ
Biogas yield and the proportion of methane in it depending on the class of degradable substances

Класс веществ	Выход биогаза, л/г субстрата	Доля метана, %
Углеводы	0,83	50
Белки	0,72	71
Жиры/Масла	1,43	70

Таким образом, в результате жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов в ходе очистки сточных вод и утилизации осадков, образующихся при этом, выделяются горючие газообразные продукты (метан и водород), которые можно использовать в качестве топлива для получения тепловой энергии.

Аппаратурное оформление анаэробного сбраживания

Анаэробные процессы чаще всего используются при очистке сточных вод небольших предприятий, в основном пищевой промышленности, а также при утилизации осадков, образующихся при аэробной очистке городских сточных вод и вторичной очистке сточных вод крупных промышленных предприятий.

Процессы анаэробного сбраживания проводят в метантенках, представляющих собой цилиндрический железобетонный резервуар с коническим дни-

щем и герметическим перекрытием, в верхней части которого устанавливают колпак для сбора биогаза. Для транспортирования газа прокладывается специальная газовая сеть из стальных труб с усиленной противокоррозионной изоляцией. На крупных очистных станциях для сбора и хранения образующегося в метантенках газа следует устанавливать газгольдеры. Этот газ можно использовать в качестве топлива в котельных установках для обеспечения нужд станций биологической очистки.

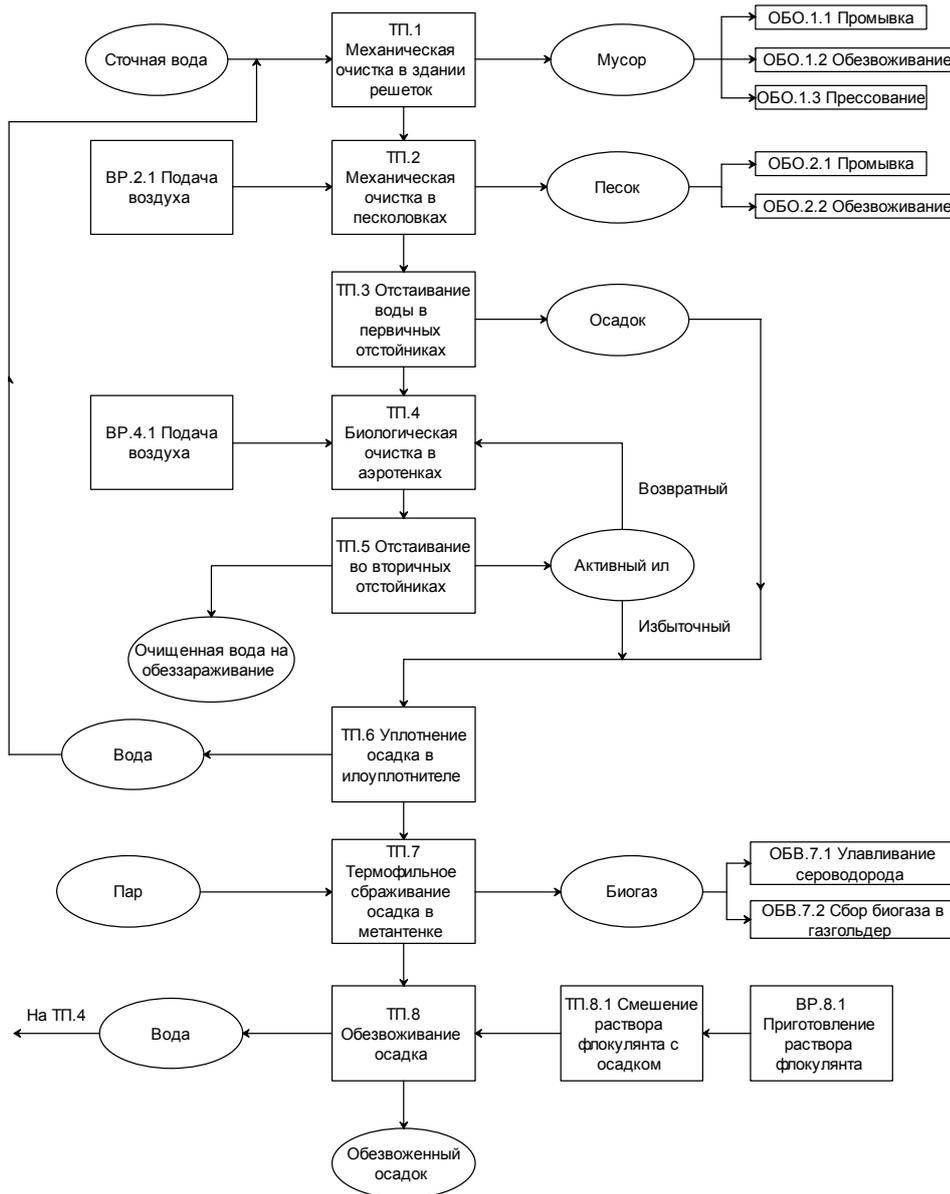
Для ускорения процесса сбраживания смесь перемешивают циркуляционными насосами, пропеллерными мешалками, что обеспечивает ее однородность во всем объеме метантенка. С помощью циркуляционных насосов обеспечивается рециркуляция бродящей массы со дна в верхнюю часть метантенка. Кроме того, при загрузке холодного осадка в верхнюю зону метантенка он, как более холодный, устремляется вниз, одновременно пузырьки выделяющегося газа поднимаются вверх. В результате происходит дополнительное интенсивное перемешивание бродящей массы в вертикальном направлении. Если метантенк оборудован инжектором, то он обеспечивает перемешивание осадка в горизонтальной плоскости аппарата.

Различают два процесса анаэробного сбраживания: мезофильное, происходящее при температуре 30–35 °С, и термофильное – при 50–55 °С. Для подогрева используют острый или глухой пар низких параметров (0,20–0,46 МПа).

Метантенки могут работать в периодическом, непрерывном и полунепрерывном режимах. При загрузке один раз в сутки скорость распада органического вещества и выход биогаза значительно меняется в период между загрузками. После загрузки выход газа в 2 раза превышает выход газа перед следующей загрузкой. Непрерывная загрузка и выгрузка метантенка устраняют данную неравномерность. При непрерывной подаче предварительно подогретого сырого осадка и его хорошем смешении с массой бродящего осадка обеспечивается равномерный тепловой режим сооружения, а также равномерное поступление питательных субстратов и возможность работы с повышенными дозами загрузки. Перевод метантенков на непрерывный режим загрузки делает возможным автоматизацию и механизацию процесса, обеспечивает уменьшение эксплуатационных затрат, равномерность выделения биогаза и однородность выгружаемого осадка.

Для утилизации осадков, образующихся при биологической очистке сточных вод, используются одноступенчатое, двух- или многоступенчатое сбраживание.

В результате процесса брожения осадка в метантенках 50% органического вещества разлагается с образованием биогаза, содержащего 65% метана, около 33–34% углекислого газа; 1–2% составляют азот, сероводород и водород. Ожидаемая теплотворная способность биогаза, образующегося в процессе сбраживания ила, составляет 5000 ккал/м³. Биогаз, выходящий из метантенков, имеет давление около 5–6 Па.



Технологическая схема процесса биологической очистки сточных вод и утилизации осадка
Technological scheme of the biological wastewater treatment and silty sediments utilization

Энергию биогаза можно использовать для подогрева утилизируемого осадка и для восполнения тепловых потерь метантенков.

Поскольку в процессе сбраживания осадков выделение газа происходит неравномерно, то для поддержания постоянного давления в газовой сети на тупиковых концах ее устанавливают аккумулирующие газгольдеры.

В настоящей работе для предприятий МУП «Водоканал» ряда городов Свердловской области разработаны дополнительные этапы обезвреживания многотоннажных осадков, образовавшихся при аэробной очистке городских сточных вод (рисунок), проведены материальные, технологические и тепловые расчеты, сделан выбор основного и вспомогательного оборудования.

Список литературы

1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: Луч, 2009.
2. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006.
3. Кузнецов А.Е. Прикладная экобиотехнология. Т. 1. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.

References

1. Žmur N.S. Tehnologičeskie i biokhimičeskie processy očistki stočnyh vod na sooruzenijah s aëro-tenkami. M.: Luč, 2009.
2. Voronov Ū.V., Ākovlev S.V. Vodootvedenie i očistka stočnyh vod. M.: Izd-vo Associačii stroitel'nyh vuzov, 2006.
3. Kuznecov A.E. Prikladnaâ êkobiotehnologiâ. T. 1. M.: BINOM. Laboratoriâ znaniĭ, 2012.

Транслитерация по ISO 9:1995