

## М.В. ШУВАЛОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, декан факультета инженерных систем и природоохранного строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет

## Р.М. ШУВАЛОВ

кандидат технических наук, начальник отдела геолого-геодезической службы Департамента строительства и архитектуры г.о.Самара

# РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ВЫБОРЕ ТИПА БИОРЕАКТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

## PERFORMANCE DATA AND CHOICE OF BIOREACTOR CONFIGURATION FOR PURIFICATION OF SMALL AGGLOMERATIONS WASTEWATER

Приведены результаты сравнения технологических показателей сооружений биологической очистки при выборе типа биореактора для очистки сточных вод малых населенных пунктов. Анализ литературных данных позволил установить двенадцать технологических преимуществ погружных биофильтров по сравнению с аэротенками. Показано, что дисковые биофильтры в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к сооружениям для биологической очистки бытовых сточных вод малых населенных пунктов.

**Ключевые слова:** сточные воды, малые населенные пункты, биореакторы, погружные биофильтры, дисковые биофильтры, аэротенки, технологические показатели биореакторов, применение погружных биофильтров на станциях биологической очистки.

Для очистки сточных вод малых населенных пунктов наибольшее практическое применение получили биологические сооружения, использующие процессы биоценоза, формирующиеся в почве при фильтровании предварительно осветленных в септиках сточных вод через слой специальной загрузки (песок, галька, щебень и др.) и (или) природный грунт. Недостатками способа почвенной очистки являются риск засоления земель и загрязнения подземных вод, а также отсутствие полной информации о последствиях процессов изменения свойств почвы при накоплении в ней биологически не разлагаемых веществ, содержащихся в сточных водах [1, 2]. В работах [2 - 6] отмечается, что при нарушении расчетной нагрузки по расходу или загрязнению, а также при изменении гидрологических условий в результате воздействия антропогенных или природных факторов происходит заиливание фильтрующего слоя загрузки.

Анализ информации об использовании сооружений для естественной биологической очистки показывает, что область распространения и эффективность их применения существенно зависят от климатических и гидрогеологических условий. Для размещения таких сооружений требуется выделение достаточно больших земельных участков с учетом установления вокруг них специальной

*The article presents a comparison of biological purification facilities performance data and its importance when choosing a particular bioreactor for wastewater purification in small aggregations. Critical analysis of professional literature has lead to the establishment of twelve technological advantages of submerged biofilters over aerotanks. It is shown that biodisks meet to the utmost the requirements for biological household wastewater purification in small aggregations.*

**Key words:** wastewater, small aggregations, bioreactors, submerged biofilters, biodisks, aerotanks, bioreactors performance data, submerged biofilters at biological purification facilities.

санитарно-защитной зоны, размеры которой определяются по СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [7]. Постоянный рост стоимости земельных участков и трудности, возникающие при выборе площадки для размещения очистных сооружений, накладывают существенные ограничения на применение сооружений естественной биологической очистки.

К сооружениям искусственной биологической очистки относятся биореакторы, оборудованные устройствами, обеспечивающими интенсификацию процессов биохимической деструкции загрязнений с помощью биоценоза, выращенного в аэробных, анаэробных или аноксидных условиях, и сооружения для отделения этого биоценоза от очищенной воды. Биореакторы классифицируются по различным признакам, основными из которых являются условия селекции биоценоза по концентрации кислорода в очищаемой воде и веществах, содержащихся в ней, конструктивные особенности корпусов (резервуаров) реакторов и оборудования систем аэрации, распределения и циркуляции воды и биоценоза, а также виды загрузочных материалов для селекции на них иммобилизованной микрофлоры.

Различают два основных вида биореакторов. К первому относятся сооружения, в которых создаются аэробные условия для функционирования

биоценоза. Это аэротенки и биофильтры различных типов, циркуляционные окислительные каналы, аэрируемые биологические пруды. Во второй вид биореакторов входят сооружения, в которых процесс обработки сточных вод производится в анаэробных условиях (например, затопленные биофильтры [8] и биосорберы с псевдооживленным слоем свободно плавающих анаэробных гранул биомассы или иммобилизованного биоценоза на зернистой загрузке [9]). Аноксидные условия обработки стоков создаются, как правило, в отдельных камерах (зонах), входящих в состав единого блока емкостей сооружений комбинированного типа.

Вторичные и третичные отстойники, флотаторы и камеры мембранных фильтров, применяемые на втором этапе биологической очистки сточных вод для отделения биоценоза от очищаемой воды, условно выделяют в отдельную группу сооружений биологической очистки.

Технология анаэробной биологической очистки сточных вод обладает возможностью получения биогаза и снижения прироста биомассы в среднем в 10 раз по сравнению с аэробной очисткой [10]. Основная практическая область применения анаэробных процессов – это первая стадия очистки высококонцентрированных производственных сточных вод, а также как дополнительная стадия очистки при глубоком удалении биогенных элементов в сочетании с аэробной стадией [8, 10–12]. Анаэробные процессы также рекомендуется применять для очистки бытовых сточных вод малых населенных пунктов [8, 10]. При этом, учитывая низкую эффективность очистки по ХПК (51,4–86,2 %) и низкий выход биогаза в психрофильном режиме при температуре 10 и 20 °С и большую продолжительность обработки стоков – 0,5–2 суток, автор статьи [8] рекомендует процесс очистки бытовых сточных вод в затопленном биофильтре осуществлять в мезофильном режиме при температуре 30–35 °С.

В зависимости от способа контакта очищаемой сточной воды и колоний микроорганизмов различают два вида сооружений: аэротенки со свободноплавающим биоценозом – активным илом и биофильтры с прикрепленным биоценозом – биопленкой. Сооружения, в которых культивируется биоценоз в свободноплавающем и прикрепленном состоянии, выделяют в отдельную группу, называемую *комбинированными сооружениями биологической очистки*. Комбинированными считаются также те, в которых в одном блоке емкостей совмещены реакторы с аэробными, анаэробными и аноксидными условиями обработки сточной воды, активного ила и биопленки. К комбинированным относятся следующие типы сооружений [1, 8, 9, 12–18]: погружные и затопленные биофильтры (со стационарным слоем загрузки и с подвижной загрузкой, находящейся в псевдооживленном состоянии), биофильтры-стабилизаторы, аэротенки-отстойники, флототенки, фильтротенки, биотенки и другие типы аэротенков с наполнителями (свободноплавающими или стационарными в виде пластмассовых засыпных, сетчатых или пластинчатых блоков, или волок-

нистых насадок «ершовой типа» и др.), аэротенки с погружными мембранными фильтрами (МБР), а также с плавающими биоротарами, окситенки, аэроакселераторы, циркуляционные окислительные каналы и аэрируемые биологические пруды, сблокированные с погружными биофильтрами, блоки емкостей, в которых производится многоступенчатая биологическая очистка сточных вод с нитриденитрификацией и дефосфотацией и др.

Все вышеперечисленные комбинированные сооружения работают в проточном режиме. К сооружениям, работающим в контактном режиме, относится контактный аэротенк с переменным рабочим уровнем жидкости, который называется также SBR-реактор периодического действия [11, 19].

Проточные биореакторы по гидродинамическому режиму движения иловой смеси подразделяются на реакторы-вытеснители, реакторы-смесители и биореакторы, в которых производится рассредоточенный выпуск сточной воды по длине сооружения, а выпуск иловой смеси – сосредоточенно в конце сооружения [13].

Продолжительность обработки стоков и концентрация биоценоза в биореакторе являются важнейшими технологическими параметрами, влияющими на эффективность работы биологических реакторов.

Н.С. Жмур приводит данные [10, с. 111], что продолжительность окисления органических загрязняющих веществ в аэротенках с регенераторами составляет до 8–18 и более часов, а продолжительность обработки воды в аэротенке – от 2 до 6 ч.

Ю.В. Воронов и др. [16, с.60] считают, что «узким местом» в функционировании единого комплекса, состоящего из сооружений биологической очистки аэротенка и вторичного отстойника, является вторичный отстойник. Поэтому доза ила в классических аэротенках назначается из условия обеспечения удовлетворительной работы вторичных отстойников и на практике ее рекомендуется принимать от 1,2 до 3 г/л [10, 13, 18]. К.М. Морозова [20] считает, что для обеспечения нормальных гидравлических нагрузок на вторичные отстойники невозможно поднимать дозу ила в аэротенке выше 4–5 г/л.

Одним из основных направлений по интенсификации работы аэрационных сооружений искусственной биологической очистки является повышение в них концентрации биоценоза [16, 18]. Поиски технических решений для достижения этой цели привели к разработке большого ряда новых комбинированных сооружений.

В комбинированных сооружениях типа аэротенк-отстойник и аэроакселератор доза ила может достигать 6–7 г/л [18]. Замена вторичных отстойников на флотаторы или фильтрующие перегородки (металлические сетки, пористая нержавеющая сталь и др.) в комплексах аэротенков-отстойников привела к появлению сооружений флототенков и фильтротенков, в которых доза ила может достигать до 16 и 25 г/л соответственно [16].

Самым современным типом модифицированных классических аэротенков являются аэротенки с

погружными (или внешними) мембранными фильтрами (МБР). В.Н. Швецовым и др. [21] установлено, что в МБР-реакторах концентрация ила может быть доведена до 12–16 г/л. Мембранное разделение биоценоза, выращиваемого в биореакторах, позволяет отказаться от применения вторичных отстойников, а также уменьшить объем биореакторов за счет увеличения в них концентрации активного ила и упростить систему окончательной дезинфекции сточных вод [21]. В 2002 г. в Германии началось практическое применение биомембранных установок в составе локальных очистных сооружений с аэротенками [22]. В статье [23] предлагается дооборудовать существующие локальные очистные сооружения с септиками погружными мембранными модулями для повышения качества очистки стоков, но при этом отмечается, что энергозатраты в среднем будут составлять 2 кВт/сут при производительности модуля 0,3–0,8 м<sup>3</sup>/сут. Стоимость биомембранной установки для обслуживания односемейного дома равняется 8000 евро [24].

Практическое применение сооружений физико-химической очистки сточных вод в малых населенных пунктах существенно ограничивается из-за высокой стоимости оборудования и эксплуатационных затрат.

Экспериментальные работы и практическое применение комбинированных сооружений показали, что они обладают более высокой окислительной мощностью. Например, в публикации [12, с. 111] показано, что окислительная мощность биотенков в 1,5 раза выше, чем у аэротенков.

Окислительная мощность по БПК классических аэротенков при очистке городских сточных вод составляет от 0,1 до 1,5 кг/(м<sup>3</sup>·сут) [10, с. 121]. Для сравнения окислительная мощность классических капельных и высоконагружаемых биофильтров при полной биологической очистке составляет 0,1–0,3 и 0,5–1,5 кг/(м<sup>3</sup>·сут) соответственно, а биофильтров с пластмассовой загрузкой – 1,6–2,2 кг/(м<sup>3</sup>·сут) [25, с. 303].

В аэрируемых затопленных биофильтрах с загрузкой из гранулированного или порошкообразного активного угля концентрация биомассы может быть доведена до 15–50 г/л [16, с. 61], а при использовании в качестве загрузки кварцевого песка – до 12–40 г/л [12, с. 112]. Окислительная мощность этого типа биофильтров достигает 10 кг/(м<sup>3</sup>·сут) [26, с. 226].

В погружных биофильтрах концентрация биомассы (по отношению к объему воды в зоне реакции) составляет 150–200 г/л [17]. Окислительная мощность дисковых биофильтров при продолжительности обработки воды 0,5 ч достигает 9,2 кг/(м<sup>3</sup>·сут) [27, с. 58].

Анализ литературных данных показывает, что затопленные и погружные биофильтры обладают очень высокой окислительной мощностью.

Все типы биофильтров подразделяются по виду загрузки материала на биофильтры с объемной и плоскостной загрузкой [1, 27, 28]. В капельных, высоконагружаемых и башенных биофильтрах с объемной загрузкой сточная вода путем орошения по-

дается на ее поверхность, откуда она фильтруется через поры загрузки, покрытой слоем биопленки, в поддон биофильтра. В биофильтрах с плоскостной загрузкой, оборудованных системой орошения, сточная вода свободно стекает по поверхности элементов загрузки, покрытых слоем биопленки, в поддон биофильтра. В погружных биофильтрах сточная вода подается в его корпус в виде ванны, в котором размещается вращающийся или попеременно окунаемый в воду блок загрузки для культивирования иммобилизованной микрофлоры.

Погружной биофильтр состоит из следующих основных конструктивных частей: корпуса биофильтра, а именно ванны для очищаемой сточной воды; ротора в виде пространственной конструкции загрузки с большой площадью поверхности, закрепленной на горизонтальном валу, который располагается над поверхностью очищаемой сточной воды в ванне биофильтра; лотков для распределения поступающей и сбора обработанной сточной воды; устройства для вращения загрузки биофильтра на горизонтальном валу.

По виду загрузки материала погружные биофильтры относятся к биофильтрам с плоскостной загрузкой [27, с. 5].

По виду пространственной конструкции загрузки погружные биофильтры подразделяют на следующие типы: дисковые, барабанные и трубчатые [28].

В погружном биофильтре трубчатого типа ротор представляет собой пакет из труб, закрепленных на горизонтальном валу [12, 28]. Трубы крепятся параллельно оси вала или под различными углами к оси его вращения. Трубы могут быть перфорированными.

В барабанном биофильтре (рис. 1) пространственная конструкция загрузки представляет собой цилиндрический каркас, закрепленный на горизонтальном валу [1, 12, 27, 28]. Цилиндрический каркас обтягивают сеткой с наружной поверхности. Внутреннюю полость барабана разделяют перфорированными перегородками на шесть – восемь секций в виде секторов. Секции заполняют загрузочным материалом на 60–90 % по объему. В качестве засыпного загрузочного материала используют жесткие пластмассовые изделия различной формы (кусочки труб, шарики и т.п.) или волокнистые синтетические материалы. Применяют также металлические, пластмассовые и асбестоцементные гладкие, гофрированные или перфорированные листы, мягкие тканевые и пленочные материалы, которые закрепляют внутри обтянутого сеткой барабана. В работах [29, с. 343; 30] описывается конструкция погружного барабанного биофильтра, которую Н.И. Куликов называет полупогружным вращающимся биобарабаном. Ротор в этом биофильтре представляет собой цилиндрический каркас, на котором послойно навиты и закреплены шнуры стеклоершового наполнителя.

Ротор барабанного биофильтра размещают на горизонтальном валу в корпусе (ванне) биофильтра выше уровня обрабатываемой сточной воды. Диаметр барабана рекомендуется принимать равным

2-2,5 м, длину – 2-3 м, степень погружения барабана в сточную воду – 0,3–0,45 диаметра. Частота вращения барабана с грузочным материалом на горизонтальном валу в корпусе биофильтра принимается в пределах от 0,5 до 5 мин<sup>-1</sup>.

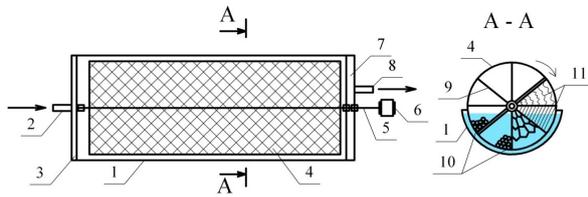


Рис. 1. Барабанный биофильтр:

- 1 – корпус биофильтра; 2 – подающий трубопровод;
- 3 – распределительный лоток;
- 4 – барабан, обтянутый металлической сеткой;
- 5 – горизонтальный вал; 6 – мотор-редуктор;
- 7 – водосборный лоток; 8 – отводящий трубопровод;
- 9 – ребра жесткости барабана;
- 10 – засыпной грузочный материал;
- 11 – закрепленный листовой грузочный материал

В дисковом биофильтре пространственная конструкция загрузки представляет собой блок (пакет) из дисков, насаженных на вал параллельно друг другу [1, 12–14, 27, 28, 31]. Схема конструкции дискового биофильтра изображена на рис. 2. Количество дисков в пакете на одном валу должно быть не более 180 штук. Диаметры дисков должны быть в пределах 1-5 м (предпочтительно 2–3 м), а расстояние между дисками – от 15 до 25 мм. Авторы работ [1, 14, 28] считают, что минимальное расстояние между дисками можно принимать до 10 мм. Вал с дисками устанавливается в корпусе биофильтра над поверхностью очищаемой сточной воды. Степень погружения дисков в сточную воду составляет 0,3–0,45 диаметра. Рекомендуемый зазор между днищем ванны и дисками рекомендуется принимать в пределах от 25 до 50 мм, такое же расстояние следует принимать между бортом ванны и крайним диском в пакете дисков, насаженных на один вал.

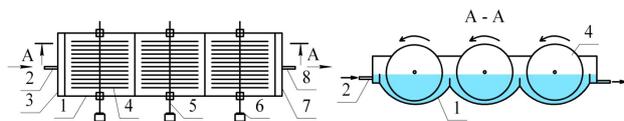


Рис. 2. Дисковый биофильтр:

- 1 – корпус биофильтра с тремя камерами;
- 2 – подающий трубопровод; 3 – распределительный лоток;
- 4 – диски; 5 – горизонтальный вал; 6 – мотор-редуктор;
- 7 – водосборный лоток; 8 – отводящий трубопровод

Диски в современных установках выполняют из полиэтилена, винилпласта, поливинилхлорида или других типов пластмассы. Для изготовления дисков применяются также металл и асбестоцемент. Толщину дисков, в зависимости от вида материала, принимают равной 1–10 мм. На современных установках большое применение находят гофрированные пластмассовые диски, а для изготовления биофильтров с диаметром ротора свыше 1–1,5 м

используют блоки, собранные из гофрированных пластмассовых сегментов. В ряде работ [4, с. 60; 32] предлагается использовать перфорированные диски диаметром до 3 м, изготовленные из пенопласта толщиной 20–100 мм. Частота вращения дисков на валу в биофильтре принимается равной от 1 до 50 мин<sup>-1</sup>. Наиболее часто рекомендуется этот параметр держать в интервале 1–10 мин<sup>-1</sup> [1, 27].

В отечественной научно-технической литературе сооружения, имеющие конструкцию дискового биофильтра, называют также биоконтактором [28], биодисковым фильтром [32–34], дисковым вращающимся биологическим фильтром [31, 35], погруженным вращающимся биофильтром [36], погружным дисковым биофильтром [1, 27], погружным вращающимся биоконтактором [37], вращающимся контактором или просто биодиском [38, 39]. Дисковый биофильтр с перфорированными дисками, совмещенный с осветлителем в одном корпусе, назван авторами книги [4] биофильтратором или биофильтром-осветлителем с перфодисками (рис. 3).

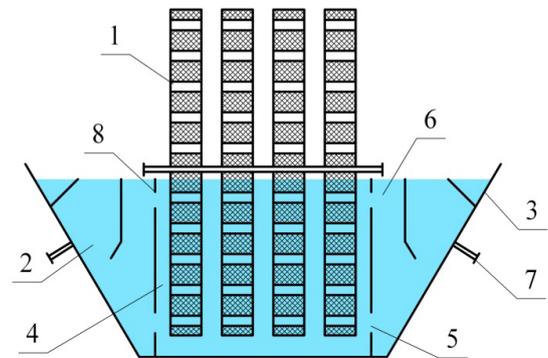


Рис. 3. Биофильтратор:

- 1 – перфорированные диски; 2 – зона осветления;
- 3 – водосборный лоток; 4 – зона аэрации;
- 5 – нижнее водопрпускное окно; 6 – зона дегазации;
- 7 – трубопровод для выпуска избыточного активного ила;
- 8 – верхнее водопрпускное окно

В зарубежной литературе тоже применяется большой ряд названий для дисковых биофильтров: Rotating Biodisk Reactor [40, 41], биологические диски [42], реактор с вращающимися дисками [26], реактор биороторного типа [43–47], но наиболее часто используется Rotating Biological Contactor (RBC) [48–53].

Для вращения ротора погружного биофильтра с грузочным материалом, который закреплен симметрично относительно оси вала, как правило, применяются мотор-редукторы с электрическим приводом. В книге [4] описана конструкция дискового биофильтра, названного биофильтратором струйным, у которого ротор приводится в движение в результате воздействия водовоздушных восходящих потоков в ванне биофильтра, образующихся в результате работы водоструйного аэратора.

В книге [16, с. 92] описан погружной биофильтр оригинальной конструкции, в котором грузочный материал выполнен в виде двух блоков, подвешенных на разных концах одного троса, закрепленного на поворотном барабане. При возвратно-

поступательном движении барабана вокруг оси блоки с грузочным материалом поочередно опускаются в бак со сточной водой. В Справочнике [4] представлено описание конструкции погружного биофильтра с использованием в качестве грузочного материала бесконечного полотна из ткани или пластмассовой ленты, которая вращается с помощью электрического привода на валу, размещенном над уровнем сточной воды в ванне биофильтра.

Корпус погружного биофильтра выполняют в виде открытой ванны, как правило, с полукруглым днищем. Очищаемая сточная вода подается в открытую ванну через впускное отверстие или через перелив, устраиваемый вдоль одной стороны, расположенный перпендикулярно или параллельно валу ротора биофильтра, а отводится вода через отверстие или перелив с противоположной стороны. Ванну корпуса погружного биофильтра обычно разделяют перегородками на 2–4 камеры, размещая в каждой из них по одному ротору, выполненному из дисков или других видов загрузки, размещенных внутри барабана. По количеству последовательно соединенных камер (или секций), через которые протекает сточная вода в процессе ее очистки, условно принято говорить о количестве ступеней очистки на биофильтре.

Одним из наиболее значимых конструктивных параметров для биофильтров является удельная площадь поверхности загрузки  $K_F$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , пропорционально которой в инженерной практике расчета дисковых биофильтров принято определять количество активной прикрепленной биопленки [32–34, 37] и окислительную мощность сооружения [4, 12, 26, 27, 31, 35, 54, 55]. Для дисковых биофильтров этот параметр вычисляют по формуле [31]:

$$K_F = \frac{F}{W}, \quad (1)$$

где  $F$  – общая площадь рабочей поверхности дисков,  $\text{м}^2$ ;  $W$  – общая вместимость ванны корпуса биофильтра,  $\text{м}^3$ .

Если требуется рассчитать удельную площадь поверхности загрузки, отнесенную к единице объема обрабатываемой воды в ванне дискового биофильтра  $K_{FN}$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , то следует использовать формулу

$$K_{FN} = \frac{F}{W(1 - K_W)}, \quad (2)$$

где  $K_W$  – коэффициент использования объема, показывающего, какую часть общего объема ванны корпуса биофильтра занимают диски, вычисляют по формуле [31]:

$$K_W = \frac{W_{disk}}{W}, \quad (3)$$

здесь  $W_{disk}$  – объем части дисков, погруженных в воду, находящуюся в ванне корпуса биофильтра,  $\text{м}^3$ .

Для дисковых биофильтров, по данным работы [12], удельная площадь поверхности загрузки находится в пределах 140–160  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . В статье [31] представлены расчетные данные, показывающие, что параметр  $K_F = 218 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при толщине дисков  $b = 3$  мм и расстоянии между дисками  $\Delta = 15$  мм для полукруглой и прямоугольной геометрической формы ванны дискового биофильтра. При этом коэффициент использования объема  $K_W = 0,116$ .

Для сравнения удельная площадь поверхности загрузки для капельных, высоконагружаемых и башенных биофильтров соответственно составляет 125, 65 и 50  $\text{м}^2/\text{м}^3$  [27, с. 60]. Для биофильтров с плоскостной загрузкой и системой подачи сточной воды на загрузку методом орошения параметр  $K_F$  составляет от 60 до 250  $\text{м}^2/\text{м}^3$  в зависимости от модификации загрузки [1].

При использовании в дисковом биофильтре перфорированных дисков удельная площадь поверхности загрузки существенно уменьшается. Например, по данным статьи [32], при коэффициенте перфорации  $\phi = 0,5$ ,  $b = 31$ –60 мм и  $\Delta = 30$  мм параметр  $K_F$  получается равным 45–60  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . В книге [4, с. 60] представлены расчеты, выполненные при  $\phi = 0,6$  в широком диапазоне параметров  $b$ ,  $\Delta$  и  $D$ , которые показывают, что при перфорации дисков параметр  $K_F$  получается в интервале 40–58  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Рекомендации по применению перфорированных дисков обосновываются тем, что такая конструкция дисковых биофильтров повышает степень насыщения кислородом обрабатываемой сточной воды. Однако результаты измерений концентрации кислорода в бытовых сточных водах, очищаемых на действующей станции с дисковыми биофильтрами, в которых диски выполнены из листового винилпласта без перфорации, показывают, что в обрабатываемых стоках наблюдаются вполне удовлетворительные аэробные условия для биоценоза биопленки. Содержание растворенного кислорода в сточной воде, находящейся в ванне такого дискового биофильтра, составляет от 3,9 до 5,3 мг/л [56]. На основании результатов этих исследований и учитывая литературные данные о том, что перфорация дисков (при  $\phi = 0,5$ –0,6) приводит к уменьшению более чем в два раза удельной площади поверхности загрузки дисковых биофильтров, следует признать конструкцию биофильтров с перфорированными дисками нерациональной.

В автореферате диссертации К.К. Давода [57] представлены результаты исследований, на основании которых показано, что барабанные биофильтры (биоконтакты) имеют более высокие массообменные характеристики по переносу кислорода, чем дисковые биофильтры, и соответственно сделан вывод – барабанные биофильтры обладают более высокой окислительной способностью.

Исследования по сравнению дискового и барабанного типов ротора в погружных биофильтрах показали, что эффективность биодеструкции загрязне-

ний практически одинакова [27, с. 58], а по данным работы [41], – на дисковом биофилт্রে выше.

Сравнение дисковых и барабанных биофилтров по параметру «удельная площадь поверхности загрузки  $K_f$ », выполненное на основе данных работы [27, с.101], показало, что значимых различий не наблюдается.

Экспериментальные работы и практический опыт применения погружных биофилтров показали, что они обладают следующими (двенадцатью) технологическими преимуществами по сравнению с аэротенками:

1) затраты электроэнергии на вращение загрузки из дисков или барабанов в погружных биофилтрах по данным справочника [13] в 5–6 раз ниже, чем затраты на аэрацию воды в аэротенках, а по данным С.В. Яковлева и др. [12], – ниже в 3–3,5 раза. В книгах [28, 39] приводятся данные о снижении потребления электроэнергии в 3–4 раза;

2) продолжительность обработки сточных вод существенно меньше. По данным И.В. Скирдова [17], при полной биологической очистке продолжительность обработки сокращается до 10–15 мин, что в 20 раз меньше, чем в аэротенках. Авторы работ [1, 28] считают, что время пребывания сточной воды в ванне корпуса дискового биофилтра должно составлять 0,5–3 ч;

3) погружные биофилтры характеризуются хорошей устойчивостью к колебаниям расхода и состава сточных вод [1, 12, 13, 28, 39, 57]. Продолжительность перерывов в подаче сточных вод на дисковые биофилтры до трех часов не нарушает их работу [35];

4) возможность очистки концентрированных производственных сточных вод от предприятий пищевой промышленности [1, 4, 12, 13, 27, 28, 36, 39, 57, 58];

5) гидравлические потери напора воды в погружных биофилтрах незначительны. По сравнению с другими типами биофилтров, разница отметок уровня воды перед и за погружным биофилтром существенно меньше [27, 28];

6) отсутствует система рециркуляции биоценоза (активного ила), что существенно упрощает процесс эксплуатации всей станции биологической очистки [1, 28, 35]. Концентрация биоценоза в виде биопленки, прикрепленной к поверхности дисков и свободноплавающей в ванне дискового биофилтра, поддерживается постоянной автоматически за счет постоянства скорости вращения дисков и специфического видового состава биоценоза [31];

7) общепризнано, что частицы биопленки, выносимые потоком воды из биофилтров, осаждаются быстрее, чем хлопья активного ила;

8) количество биопленки, выносимой потоком воды из биофилтров, обычно меньше, чем избыточного ила из аэротенков, – 0,4–0,6 кг/кг снятой БПК<sub>5</sub> [38]. Например, при очистке производственных сточных вод с БПК<sub>20</sub> 1000–2000 мг/л на дисковом биофилтре было установлено, что прирост биопленки составляет в среднем 0,3 кг/кг снятой БПК [31];

9) при обезвоживании биопленки операцию гравитационного уплотнения осадка не выполняют. Влажность биопленки, удаляемой из вторичных отстойников, принято считать равной 96 % [59], а влажность активного ила – 99,4–99,7 % [10, с. 128]. Поэтому на станциях очистки с биофилтрами влажного осадка образуется в 5–10 раз меньше по объему;

10) при эксплуатации вторичных отстойников после биофилтров не возникают такие трудности, как вспухание активного ила, пенообразование и вынос активного ила [60];

11) период выхода биофилтров с плоскостной загрузкой на расчетный уровень очистки сточных вод составляет 7–10 сут [31, 60];

12) компактность погружного биофилтра и возможность промышленного изготовления ротора для такого биофилтра, а также всего сооружения в заводских условиях.

В пособии [14, с. 165] рекомендуется применять дисковые биофилтры не только для полной биологической очистки сточных вод, но и для осуществления процессов нитрификации и денитрификации. По данным авторов работ [40, 48, с. 63; 51, 54, 61], на дисковых биофилтрах достигается высокая эффективность окисления аммонийного азота. Например, на трехступенчатом дисковом биофилтре содержание аммонийного азота может быть снижено с 20 до менее 1 мг/л при температуре сточных вод 29 °С, а при температуре 13 °С – до 11 мг/л [51]. В этой же работе приводятся данные о возможности очистки до 2 мг/л при температуре 13 °С, но для этого требуется увеличение продолжительности обработки стоков. В статьях [47, 50] сообщается, что имеется длительный промышленный опыт эксплуатации дисковых биофилтров, который подтверждает возможность использования этого типа сооружений для осуществления на них процесса нитрификации. А. Ghrabi и др. [40] провели эксперименты на пилотной установке очистки с рециркуляцией воды (первичный отстойник, затопленный пластинчатый биофилтр – анаэробный реактор, дисковый биофилтр-нитрификатор, вторичный отстойник) с полезной производительностью 12 м<sup>3</sup>/сут. В процессе осуществления нитри-денитрификации на этой установке общее содержание азота снижалось на 82 % при исходной концентрации аммонийного азота, равной 33 мг/л, и содержании ХПК 398 мг/л.

Принято считать, что оптимальная область применения погружных биофилтров – это очистные сооружения с пропускной способностью от 1 до 1000 м<sup>3</sup>/сут в малых населенных пунктах и на промышленных объектах [1, 12, 13, 15, 17, 27, 28, 35, 38, 39, 43–45, 47, 48, 54, 57, 62]. В работах [1, 28, 32] приводится информация о применении дисковых биофилтров на станциях очистки производительностью до 150–200 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а в работе [26, с. 222] отмечается, что в США уже с начала 70-х гг. прошлого столетия дисковые биофилтры применяются на станциях очистки всех масштабов.

Ряд авторов работ [17, 32, 39, 43–45] считают, что для очистки сточных вод малых населенных пунктов в качестве основного варианта следует вы-

бирать погружные биофильтры, если отсутствуют условия для применения сооружений естественной биологической очистки.

Анализ литературных данных [4, 12–16, 26, 27, 29, 32, 33, 35, 38, 39, 42, 47, 48, 50, 51, 57, 63, 64] показывает, что дисковые биофильтры являются наиболее широко применяемым на практике типом погружных биофильтров. Основной причиной этого является то, что конструкция ротора погружного биофильтра, собранная из дисков или отдельных блоков скрепленных листов пластмассы (в форме сегментов или квадратов), гораздо проще и надежней в эксплуатации по сравнению с барабаном, обтянутым сеткой и заполненным засыпной загрузкой. В дополнение следует отметить, что при работе барабанных биофильтров с засыпной загрузкой происходит механическое повреждение био пленки, возникающее в результате перемещения загрузки во вращающемся полом барабане [4, с. 48].

В книге [38, с.134] приводятся данные о том, что в США к 1980 г. было запущено в работу около 300 станций очистки с погружными биофильтрами. В Канаде, Японии, Великобритании, Швеции, Швейцарии и Германии погружные биофильтры широко используются для очистки сточных вод [12, 26, 27]. Ни один из типов погружных биофильтров, кроме дисковых, не получил настолько широкого распространения, чтобы для него были выработаны общие рекомендации по проектированию [26, с. 226].

В работе [39] сообщается, что в РФ и странах СНГ с 1991 по 2005 гг. фирмой НПП «ЭКОТЕХНИКА» было введено в эксплуатацию более 40 станций очистки с дисковыми биофильтрами. В Самарской области в настоящее время дисковые биофильтры применяются только на двух станциях очистки бытовых сточных вод из 77 действующих коммунальных очистных сооружений в малых населенных пунктах. Эти данные указывают на ограниченное применение дисковых биофильтров в нашей стране.

До настоящего времени отсутствует достаточно четкое описание процессов, происходящих в био пленке на биофильтрах [1, с. 308; 57]. На основе результатов *аналитических исследований* [26, 32–34, 53, 64], показывающих, что в процессе биодеструкции загрязнений принимает участие только незначительная доля био пленки в виде так называемой активной части внешнего слоя био пленки, имеющего толщину до 70–300 мкм, формируется представление о низкой эффективности биомассы в классических и погружных биофильтрах. Такое представление о физической модели процессов биологической очистки на погружных биофильтрах сдерживает их массовое применение. Подтверждением этого предположения является статья [65], в которой предлагается применять аэротенки-отстойники и не рекомендуется использовать погружные биофильтры, обосновывая это тем, что в этих биофильтрах биоценоз обладает ограниченной сорбционной способностью.

## Выводы

1. Наиболее рациональным решением вопроса очистки сточных вод малых населенных пунктов является применение сооружений для искусственной биологической очистки.

2. Дисковые биофильтры в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к сооружениям для биологической очистки бытовых сточных вод малых населенных пунктов. Однако в Российской Федерации этот тип сооружений не нашел широкого применения.

3. По мнению ведущих ученых, до настоящего времени отсутствует достаточно четкое описание процессов, происходящих в био пленке на биофильтрах. Ряд исследователей считают, что в процессе биодеструкции загрязнений на биофильтрах принимает участие только незначительная доля био пленки в виде так называемой активной части внешнего слоя био пленки, имеющего толщину до 70–300 мкм. Такие сведения о физической модели процессов биологической очистки формируют представление о низкой эффективности биомассы в биофильтрах, в том числе и в дисковых биофильтрах.

4. Недостаточная теоретическая изученность процессов биологической очистки сточных вод в дисковых биофильтрах сдерживает их массовое применение. Это вызывает необходимость проведения теоретических и специальных экспериментальных исследований на реальных сточных водах с применением дисковых биофильтров промышленного масштаба в условиях действующих очистных сооружений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.
2. Сергиенко, Л.И. Естественные методы очистки сточных вод. Проблемы, поиск решений, перспективы [Текст] / Л.И. Сергиенко, А.В. Шурховецкий // Эколого-экономическая оптимизация природопользования: материалы Круглого стола; 30 марта 2004. – Волгоград: Изд-во Вол-ГУ, 2004. – С. 157–159.
3. Крейсл, Дж.Ф. Системы сброса и очистки сточных вод малых населенных пунктов [Текст] / Дж.Ф. Крейсл // Водоснабжение и санитарная техника. – 1994. – № 1. – С. 23–27.
4. Таварткиладзе, И.М. Очистные сооружения водоотведения: справочник [Текст] / И.М. Таварткиладзе, и др. – К.: Будівельник, 1988. – 256 с.
5. Разумовский, Э.С. Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных пунктов [Текст] / Э.С. Разумовский, и др. – М.: Стройиздат, 1986. – 173 с.
6. Versickerung biologisch behandelter Abwässer [Text] / Goldberg Bernd // WWT: Wasserwirt. Wassertechn. – 2003. – № 12. – S. 46–48.

7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы [Текст]. – М., 2008.
8. Унгурияну, Д.В. К вопросу о совершенствовании и интенсификации биологической очистки сточных вод [Текст] / Д.В. Унгурияну // Вода: технология и экология. – СПб., 2007. – № 1. – С. 21–30.
9. Данилович, Д.А. Разработка перспективных биотехнологий очистки сточных вод [Текст] / Д.А. Данилович, и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 10. – С. 58–66.
10. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками [Текст] / Н.С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
11. Колесников, В.П. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях [Текст] / В.П. Колесников, Е.В. Вильсон; под ред. академика ЖКХ РФ В.К. Гордеева-Гаврикова. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Юг», 2005. – 212 с.
12. Яковлев, С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения [Текст] / С.В. Яковлев, и др.; под ред. С.В. Яковлева. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
13. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: справочник проектировщика [Текст] / Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др.; под общ. ред. В.Н. Самохина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
14. Стир, Э. Пособие специалиста по очистке стоков [Текст] / Э. Стир, М. Фишер // Немецкое объединение по водному хозяйству. – 14-е изд. – Варшава: Зайдель-Пживецки, 2002. – 407 с.
15. Репин, Б.Н. Очистка сточных вод в условиях малых населенных мест [Текст]: обзорная информация / Б.Н. Репин, Г.Г. Иванов, А.П. Иванов. – М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1977. – 38 с.
16. Воронов, Ю.В. Реконструкция и интенсификация работы канализационных очистных сооружений [Текст] / Ю.В. Воронов; под ред. С.В. Яковлева. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
17. Скирдов, И.В. Очистка сточных вод с применением прикрепленной микрофлоры [Текст] / И.В. Скирдов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 6. – С. 10–12.
18. Демидов, О.В. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод [Текст] / О.В. Демидов, И.В. Скирдов // Там же. – 1996. – № 3. – С. 16–18.
19. Gongye yongshui yu feishui [Text] / Yun-long Yang, Qi-bin Chen // Water and Wastewater. – 2002. – Vol. 33, № 2. – С. 1–3.
20. Морозова, К.М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод [Текст] / К.М. Морозова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 1. – С. 26–31.
21. Швецов, В.Н. Теоретические и технологические аспекты применения биомембранных технологий глубокой очистки сточных вод [Текст] / В.Н. Швецов, К.М. Морозова, И.А. Нечаев // Там же. – 2006. – № 12. – С. 25–29.
22. Kleinanlagen mit Membranfiltration [Text] / Goldberg Bernd // WWT: Wasserwirt. Wassertechn. – 2006. – № 1–2. – С. 17–23.
23. Dezentrale Abwasserbehandlung mit Membrantechnologie [Text] / Torsten Hackner, Simone Meuler // bbr. – 2004. – Vol. 55, № 11. – С. 54–56.
24. Kleinklaranlage mit Mikrofiltration [Text] / Anja Busse // WWT: Wasserwirt Wassertechn. – 2003. – № 7–8. – С. 36–38.
25. Возная, Н.Ф. Химия и микробиология [Текст] / Н.Ф. Возная. – М.: Вышш. школа, 1979. – 340 с.
26. Хенце, М. Очистка сточных вод [Текст]: пер. с англ. / М. Хенце, и др. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
27. Яковлев, С.В. Биологические фильтры [Текст] / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 120 с.
28. Инженерное оборудование зданий и сооружений: энциклопедия [Текст] / гл. ред. С.В. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1994. – 512 с.
29. Белецкий, Б.Ф. Конструкции водопроводно-канализационных сооружений: справ. пособие [Текст] / Б.Ф. Белецкий, и др.; под общ. ред. Б.Ф. Белецкого. – М.: Стройиздат, 1989. – 448 с.
30. Куликов, Н.И. Малогабаритные канализационные очистные установки для села [Текст] / Н.И. Куликов, Н.И. Зотов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – № 6. – С. 25–26.
31. Дмитриевский, Н.Г. Некоторые вопросы теории и расчета дисковых вращающихся биологических фильтров [Текст]. // Там же. – 1977. – № 2. – С. 4–6.
32. Олейник, А.Я. Расчет биофильтров с вращающейся загрузкой [Текст] / А.Я. Олейник, И.М. Чёрный // Водоснабжение и санитарная техника. – 1989. – № 3. – С. 24–26.
33. Олейник, А.Я. Математическое моделирование биологической очистки сточных вод на биодисковых фильтрах [Текст] / А.Я. Олейник, Ш.В. Шайеб // Химия и технология воды. – 1994. – Т. 16, № 5. – С. 501–508.
34. Степовая, Н.Г. Определение толщины активной части биопленки [Текст] / Н.Г. Степовая // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 75–78.
35. Фесик, Л.А. Влияние неравномерности подачи бытовых сточных вод на технологический процесс в дисковых вращающихся биофильтрах [Текст]: дис. ... канд. техн. Наук / Л.А. Фесик; Одес. гос. акад. стр-ва и арх. – Одесса, 1994. – 247 с.
36. Фортученко, Л.А. Очистка сточных вод предприятий бродильной промышленности на примере дрожжевых и спиртовых производств [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. Наук / Л.А. Фортученко; Одес. инж.-строит. институт. – Одесса, 1973. – 31 с.
37. Феафанов, Ю.А. Математическая модель погружных вращающихся биоконтакторов [Текст] / Ю.А. Феафанов, К. Давод // Доклады 60-й научн. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов СПбГАСУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2003. – С. 43–45.
38. Яковлев, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
39. Разумовский, Э.С. Очистные сооружения «Биодиск» для малых населенных мест [Текст] / Э.С. Разумовский, Э.И. Рукин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 4. – С. 27–29.
40. Nitrification-dénitrification des eaux usées urbaines de la ville de Tunis dans une station pilote à biodisques [Text] / A. Ghrabi, L. Bousselmi, R. Benyagoub, M. Ennabli // Technology, science, méth. – 2001. – № 11. – P. 46–52.

41. Development and modeling of a rotating disc photocatalytic reactor for wastewater treatment [Text] / Lianfeng Zhang, William A. Anderson, Jason Zhang Zisheng // Chem. Eng. J. – 2006. – Vol. 121, № 2–3. – P. 125–134.
42. Хаммер, М. Технология обработки природных и сточных вод [Текст]: пер. с англ. (1975, by John Willey&Sons. Inc.) / М. Хаммер. – М.: Стройиздат, 1979. – 400 с.
43. Kleine Kläranlagen [Text] / D. Schreff, P. Wilderer // Korrespond. Abwasser. – 1999. – Vol. 46, № 10. – S. 1522–1525.
44. Constructed wetlands: A strategy for sustainable wastewater treatment at small treatment works [Text] / P. Griffin, J. Upton // Water and Environ. Manag. – 1999. – Vol. 13, № 6. – P. 441–446.
45. Les petites stations d'epuration du basin Artois-Picardie: etat des lieux et perspectives [Text] / Jean Philippe Karpinski, Sylvain Lemang // Eau, ind., nuisances. – 2003. – № 263. – S. 57–60.
46. Tap chi hoa hoc [Text] / Dang Quang Hung, Pham Hung Việt // J. Chem. – 2001. – Vol. 39, № 2. – P. 101–105.
47. Rotationstauchkorpertechnik [Text] // F und S: Filtr. und Separ. – 2002. – Vol. 16, № 2. – S. 84.
48. Small wastewater treatment plants III [Text] / Y. Watanabe // Water Science and Technology. – 1997. – Vol. 35, № 6. – P. 1–154.
49. Sewage treatment in a rotating biological contactor (RBC) system [Text] / A. Tawfik, H. Temmink, G. Zeeman, B. Klapwijk // Water, Air, and Soil Pollut. – 2006. – Vol. 175, № 1–4. – P. 275–289.
50. Improving waste water with Biodisc [Text] // Water and Waste Treatment (Gr. Brit). – 1992. – Vol. 35, № 12. – P. 39.
51. RBC nitrification design using zero-order kinetics [Text] / J. Edward // Environ. Progr. – 1993. – Vol. 12, № 4. – P. 262–265.
52. Three-dimensional mapping of oxygen distribution in wastewater biofilms using an automation system and microelectrodes [Text] / De La Rosa Carlos, Yu Tong // Environ. Science And Technology. – 2005. – Vol. 39, № 14. – P. 5196–5202.
53. Application of mass transfer to rotating biological contactors [Text] / J. Famularo, J. Mueller, T. Mulligan // Journal of Water Pollution Control Federation. – 1978. – Vol 50. – № 4. – P. 653–671.
54. Волкова, Г.А. Очистка сточных вод на дисковых биофильтрах [Текст] / Г.А. Волкова, О.Я. Маслова // Механизация строительства. – 1998. – № 5. – С. 17–20.
55. Дмитриевский, Н.Г. Унификация технологического расчета сооружений биологической очистки сточных вод [Текст] / Н.Г. Дмитриевский // Строительство и архитектура. – 1989. – № 2. – С. 86–89.
56. Шувалов, М.В. Результаты экспериментальных и теоретических исследований структуры биопленки в дисковых биофильтрах [Текст] / М.В. Шувалов, Р.М. Шувалов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 67-й Всероссийской научн.-техн. конф. по итогам НИР за 2009 г.; СГАСУ. – Самара, 2010. – С. 588–589.
57. Давод, К. Совершенствование технологии очистки сточных вод на вращающихся биоконтакторах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. Давод; С.-Петербург. гос. архит.-строит. ун. – СПб. 2003. – 21 с.
58. Good management practice in biological waste treatment [Text] / Eschkotter Helmut // 27 International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology, Frankfurt am Main, 19–24 May 2003. AICHEMA 2003. Abstracts of the Lecture Groups: Sensor for Water Systems, Sustainable Water Management, Contaminants in Groundwater, Wastewater and Sludge, Waste Gas, Adsorption Technology for Waste Gas, Airborne Particles, Gas Sensors, Waste Management. Frankfurt/Main: DECHEMA, 2003. – P. 128.
59. СНиП 2.04.03.-85. Канализация. Наружные сети и сооружения [Текст] / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с.
60. Ивчатов, А.Л. Ещё раз о биологической очистке сточных вод [Текст] / А.Л. Ивчатов, С.Н. Гляденов // Экол. промышленность России. – 2003, апрель. – С. 37–40, 49.
61. Zhejiang daxue xuebao. Nongye yu shengming kexue ban [Text] / Bai Xio-hui, Li Gang, Zhong Wei-guo // J. Zhejiang Univ. Agr. and Life Sci. – 2001. – 27, N 2. – P. 205–209.
62. Новак, В.А. Очистка хозяйственно-бытовых стоков малых поселений – проблемы и решения [Текст] / В.А. Новак, и др. // Вода. – 2002. – № 10. – С. 17–24.
63. Бойко, В.А. Оптимизация работы дисковых вращающихся биофильтров / В.А. Бойко, И.В. Довгань, С.Г. Дырикова // Химия и технология воды. – 2000. – Т. 22, № 2. – С. 222–229.
64. Шайб, Ш.В. Моделирование и расчеты биологической очистки сточных вод на биодисковых фильтрах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ш.В. Шайб; Киев. гос. тех. универ. стр-ва и арх. – Киев, 1996. – 19 с.
65. Колесников, В.П. Развитие сооружений биологической очистки сточных вод [Текст] / В.П. Колесников // С.О.К.: Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2004. – № 5. – С. 36.

© Шувалов М.В., Шувалов Р.М., 2011