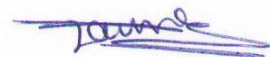


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ А.Г. и Н.Г. СТОЛЕТОВЫХ»**

На правах рукописи



Фарзах Фаваз Салим Фатах

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД
ГОРОДА ВЛАДИМИРА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВЕРМИФИЛЬТРАЦИИ**

03.02.08 – Экология (биология)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор медицинских наук
профессор Н. П. Ларионов

Владимир – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
1. 1. Сточные воды	11
1.1.2. Хозяйственно-бытовые сточные воды	13
1.1.3. Промышленные сточные воды	14
1.2. Вермифльтрация – основы технологии	14
1.2.1. Механизмы действия дождевых червей	17
1.2.2. Системы вермифльтрации	20
1.3. Ключевые факторы, влияющие на процесс вермифльтрации.....	24
1.3.1. Виды дождевых червей, подходящие для вермифльтрации.....	24
1.3.2. Численность популяции компостных червей	25
1.3.3. Аэробность системы	26
1.3.4. Качество сточных вод	27
1.3.5. Выбор фильтрующей среды	28
1.3.6. Время гидравлического удерживания	29
1.3.7. Скорость гидравлической нагрузки	31
1.3.8. Удаление органики (БПК ₅ и ХПК)	32
1.4. Важные научные исследования по очистке сточных вод с помощью технологии вермифльтрации	33
1.5. Примеры практического использования крупномасштабных систем вермифльтрации для очистки сточных вод	49
1.6. Значение и преимущества технологии вермифльтрации перед традиционными системами очистки сточных вод	58
1.7. Сезонные изменения и эффективность системы вермифльтрации	61
1.8. Адсорбционная доочистка сточных вод	61
1.9. Стерилизация сточных вод после вермифльтрации с помощью электрохимически активированной воды Анолит АНК	63

1.10. Заключение	64
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	65
2.1. Отбор проб сточных вод	65
2.2. Виды дождевых червей, используемых для вермифiltrации	66
2.3. Биохимическая потребность в кислороде (БПК ₅)	66
2.4. Химическая потребность в кислороде (ХПК)	67
2.5. Взвешенные вещества	68
2.6. Методика определения значения pH	68
2.7. Методика измерения электропроводности	69
2.8. Методика определения содержания растворенного в воде кислорода ...	69
2.9. Коли-титр	70
2.10. Время гидравлического удерживания	70
2.11. Скорость гидравлической нагрузки	70
2.12. Характеристика материалов для вермифильтра	71
2.13. Активированные угли	72
2.14. Анолит АНК	73
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	74
3.1. Конструкция лабораторной установки для вермифiltrации сточных вод	74
3.1.1. Подготовка фильтрующих материалов и их характеристика	74
3.1.2. Очистка сточных вод	78
3.2. Конструкция лабораторной установки для длительной вермифiltrации сточных вод	82
3.3. Определение фитотоксичности и ростовых свойств вермифильтрата ...	85
3.4. Использование электрохимически активированной воды Анолит АНК для удаления остаточной микрофлоры в вермифильtrate	86
3.5. Преимущества, недостатки и ограничения технологии очистки сточных вод с помощью вермифiltrации	88
3.6. Автоматизированная система вермифiltrации для очистки сточных	

Вод.....	90
3.7. Заключение	96
3.8. Список работ, опубликованных по теме диссертации	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Нарастающий мировой дефицит пресной воды является одной из ключевых проблем, стоящих перед человечеством в XXI веке. По данным Всемирной организации здравоохранения, более двух миллиардов человек на планете страдают от недостатка воды, а по прогнозам, к 2050 году уже половина жителей планеты будет испытывать ее нехватку. Это вызывает естественную озабоченность мирового сообщества, и в период с 2005 по 2015 год проведено множество мероприятий и реализованы международные проекты в рамках Международной декады «Вода для жизни».

В Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2004 г.», приведен ряд фактов, которые свидетельствуют о предкризисной ситуации с питьевой водой в стране. Так, например, в Российской Федерации в 2004 г. было использовано около 60 км³ свежей воды, а объем нормативно очищенных сточных вод в 2004 г. составил всего 2 км³.

В РФ предусматриваются антикризисные мероприятия, которые направлены на восстановление качества вод и их охрану. Должны быть разработаны действенные способы предотвращения загрязнения водных объектов сточными водами и поверхностным стоком с водосборной площади, обустройство водоохраных зон и прибрежных защитных полос.

В Султанате Оман активно разрабатываются специальные охранные технологии, направленные на профилактику загрязнения водных объектов.

Такая стратегия согласуется и с общемировой тенденцией. Согласно рекомендациям Комитета ООН по водным ресурсам предлагается снизить забор воды из возобновляемых источников, а потребность в воде хотя бы частично обеспечивать путем рециркуляции.

В настоящее время все больший интерес проявляется к методам

очистки сточных вод небольших населенных пунктов и отдельных предприятий с использованием дождевых червей вида *Eisenia fetida*, который является технической культурой и по скорости размножения превосходит многие другие виды.

Дождевые черви поглощают взвешенные частицы, переваривают и выделяют их в виде копролитов (Huges et al., 2005). Новая технология вермифильтрации малозатратна, исключает образование осадков и выделение вредных газов. Это особенно важно для удаленных сельских общин, где отсутствуют современные дорогостоящие системы очистки сточных вод.

Органические вещества в кишечнике подвергаются химическим трансформациям, обогащаются микроорганизмами и выделениями червей, содержащими кальций и ферменты. Органические отходы сточных вод превращаются в удобрения, содержащие питательные элементы в доступной для растений форме, обладающие зернистой структурой, устойчивой к размывающему действию воды (Покровская С.Ф., Касатиков В.А., 1987).

Особый интерес привлекают исследования по переработке жидких осадков сточных вод вермикulturой без использования наполнителя, когда на дно обвалованного участка укладывают опилки, заселенные червями. Таким способом можно переработать большое количество осадков сточных вод, ранее не находившие применения (Green 1981). Создаются установки для непрерывного вермикомпостирования осадков сточных вод с применением методов автоматизации, которые перерабатываются червями в интенсивно аэрируемой верхней части реактора. По мере уплотнения вермикомпоста черви переползают в вышележащие слои, а выгрузка компоста происходит в нижней части реактора (Bonini 1982). Высокая скорость вермикомпостирования обусловлена измельчением субстратов и соответственно увеличением площади контакта с микроорганизмами – деструкторами (Ferrari 1983).

Продукты вермикомпостирования ускоряют рост сельскохозяйственных

культур благодаря трансформации органического азота в минеральный и торможению вымывания питательных веществ. Вермикомпостирование способствует переводу тяжелых металлов в малоподвижные соединения.

Это особенно важно для загрязненных почв, утративших способность к самоочищению.

Деградация почвенного покрова – одна из самых острых проблем на Земле. Весьма актуальной также является проблема снижения урожайности в связи с повышением числа вредителей и болезней. Необходимо организовать производство таких удобрений, которые будут способствовать стимуляции роста растений, а также повышать их устойчивость к болезням и стрессам. К таким удобрениям относится вермикомпост.

Основной задачей систем канализации и очистных станций является разложение органических компонентов сточных вод, количество которых в стоках оценивается по двум интегральным показателям БПК и ХПК. Обычные значения БПК канализационных стоков лежат в диапазоне от 150 до 500 мг/дм, а ХПК – от 300 до 800 мг/дм. БПК сточных вод молокозаводов может достигать 4000 мг/дм, а ХПК – 8000 мг/дм. Эти данные свидетельствуют о высокой удобрильной активности канализационных стоков и актуальности проблемы использования их в сельском хозяйстве.

Цель работы: исследовать экологические и физико-химические аспекты вермифiltrации сточных вод г.Владимира культурой *Eisenia fetida* в эксперименте.

Задачи исследования:

1. Оценить эффективность вермифiltrации технических сточных вод молокозавода культурой *Eisenia fetida* в эксперименте.
2. Оценить эффективность вермифiltrации муниципальных сточных вод г.Владимира культурой *Eisenia fetida* в эксперименте.
3. Изучить технические и экономические предпосылки для использования электрохимически активированной воды «Анолит АНК» для дезинфекции вермифiltrата.

4. Разработать рекомендации для внедрения технологии вермифiltrации хозяйственных и бытовых сточных вод для Султаната Оман.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время активно ведутся прикладные эколого-физиологические исследования, связанные с совершенствованием технологий вермикомпостирования. Вместе с тем, актуальное и востребованное направление, связанное с широким использованием сточных вод в сельскохозяйственных технологиях – вермифiltrация находится на самых начальных этапах своего развития. Недостаточно изучены вопросы, связанные с теорией и практикой вермифiltrации, не исследованы возможности вермифiltrации канализационных стоков в зависимости от концентрации органических веществ. Не разработаны методы дезинфекции вермифiltrатов, удаления химических токсикантов и солей тяжелых металлов.

Научная новизна исследования

Впервые в эксперименте изучен процесс вермифiltrации сточных вод с использованием культуры *Eisenia fetida*; изучена динамика снижения уровня токсикантов в процессе вермифiltrации, проведена оценка возможности использования вермифiltrата в сельском хозяйстве. Установлено, что одним из важнейших параметров продуктивного функционирования системы вермифiltrации является скорость вермифiltrации, регулируемая на основе мониторинга влажности вермифiltrата, которая не должна превышать 80%. Показано, что эффективность процесса возрастает при длительном пропускании через установку сточной воды вследствие обрастания сорбентов биопленкой из микроорганизмов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные результаты исследований вносят вклад в разработку теоретических основ технологии вермифiltrации и обоснования рекомендаций по практическому использованию ее в сельском хозяйстве.

Представленные в диссертации экспериментальные данные являются основой для разработки и внедрения в практику технологии очистки сточных вод с применением технологии вермифильтрации в Султанате Оман.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В условиях жаркого климата, дефицита водных ресурсов и при небольших объемах сточных вод вермифильтрация может использоваться в качестве альтернативы традиционным способам очистки сточных вод.

2. Основным параметром продуктивного функционирования установки для вермифильтрации является скорость подачи сточных вод, регулируемая на основе мониторинга влажности вермифильтра, которая не должна превышать 80%.

3. Эффективность процесса вермифильтрации возрастает при пропускании через установку сточной воды в течение 10-14 дней, что способствует обрастанию наполняющих ее материалов биопленкой из микроорганизмов. Вермикультура в составе вермифильтра при взаимодействии с почвенными микроорганизмами, иммобилизованными на биофильтре, удаляет из сточных вод органические и неорганические загрязнители в результате их поглощения и биodeградации.

4. Технология вермифильтрации может успешно использоваться для сточных вод с высоким уровнем содержания органических веществ, когда показатель БПК находится в диапазоне величин от 1000 до 1500 мг O₂/дм³

5. Применение электро-активированной воды «Анолит АНК» в процессе вермифильтрации можно оценить как новый безопасный и дешевый способ дезинфекции сточных вод при их использовании в сельском хозяйстве.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается репрезентативностью экспериментальных выборок, корректным использованием методов статистического анализа и современных аналитических методик.

Апробация исследований

Результаты работы были представлены на Международных научных конференциях (8 тезисов и статей в материалах конференций). По теме диссертации опубликована 12 статья, подана патентная заявка на полезную модель РФ и патентная заявка на изобретение в Султанате Оман.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания объектов и методов исследования, изложения результатов экспериментов и их обсуждения, заключения, выводов и списка упоминаемых литературных источников. Работа изложена на 119 страницах текста, включает в себя 23 рисунка и 7 таблиц. Список литературы состоит из 167 наименований, из них 122 зарубежные.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Сточные воды

Сточные воды - это пресные воды, изменившие свои физико-химические и биохимические свойства в результате хозяйственно-бытовой и промышленной деятельности человека. Сточные воды генерируются из различных источников таких, как домашние хозяйства, отели, больницы, животноводческие фермы, промышленными предприятиями и другие. Сточные воды - это, пожалуй, самый очевидный, самый видимый ущерб окружающей среде, прежде всего гидросфере (рекам, озёрам, морям и даже океанам). Полагают, что для обеспечения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в сбрасываемых сточных водах путём их разбавления необходимо около 1/3 всего мирового запаса пресной воды. Поэтому уже в начале 1980-х гг. в нашей стране стали уделять особое внимание этому аспекту защиты биосферы (Мухин, Клушин, 2012).

По происхождению сточные воды разделяют на следующие классы: хозяйственно-бытовые, промышленные и атмосферные. В хозяйственно-бытовых сточных водах содержатся минеральные и органические загрязняющие вещества, находящиеся в растворённом, коллоидном и нерастворённом состояниях. В бытовых стоках содержится примерно 60% загрязнений органического происхождения и 40% минеральных веществ. Органические загрязнения являются благоприятной средой для развития микроорганизмов, поэтому в стоках содержатся биологические загрязнения (бактерии, грибки, яйца гельминтов и вирусы).

Вот некоторые важнейшие показатели, характеризующие загрязнённость сточных вод:

Биохимическая потребность в кислороде (БПК) – количество кислорода, потребляемое аэробными микроорганизмами в процессе

жизнедеятельности для окисления органических веществ, содержащихся в сточной воде. Этот показатель характеризует содержание органики, которое может быть удалено методом биологической очистки. При анализе определяется количество кислорода, ушедшее за установленное время (обычно в течение 5 суток —БПК₅) без доступа света при 20° С на окисление загрязняющих веществ, содержащихся в единице объема воды. Непосредственно вычисляется разница между концентрациями растворённого кислорода в пробе воды после отбора и после инкубации. Как правило, в течение 5 суток при нормальных условиях происходит окисление около 70 % легкоокисляющихся органических веществ. Практически полное окисление (БПК_{полн} или БПК₂₀) достигается в течение 20 суток.

Химическая потребность в кислороде (ХПК) – общее количество кислорода, необходимое для окисления всего органического материала (биологически активного, инертного органического вещества) с образованием углекислого газа и воды, а также окисляемого неорганического вещества. Значение ХПК всегда больше значения БПК, поскольку происходит окисление как инертных органических веществ, так и биологически активных органических веществ.

Взвешенные вещества – количество примесей, которое задерживается на бумажном фильтре при фильтровании пробы.

Сухой остаток – количество загрязнений, остающееся после выпаривания пробы в термостате при температуре 105° С.

Мутность – показатель, характеризующий уменьшение прозрачности воды в связи с наличием в ней тонкодисперсных примесей: нерастворимых или коллоидных частиц различного происхождения (неорганических и органических взвесей).

Концентрация ионов водорода – выражается величиной рН. Среда считается кислой при $\text{pH} < 7,0$, нейтральной при $\text{pH} = 7,0$ или щелочной при $\text{pH} > 7,0$. Муниципальные сточные воды обычно имеют слабощелочную реакцию среды рН 7,2-7,8.

Коли-титр – это наименьшее количество исследуемого материала в миллилитрах, в котором обнаруживается один живой микроорганизм кишечной палочки *Escherichia coli*. Этот показатель косвенно характеризует степень зараженности воды патогенными микроорганизмами.

1.1.2. Хозяйственно-бытовые сточные воды

Хозяйственно-бытовые сточные воды представляют собой мутную жидкость, которая богата минеральными и органическими веществами. Вода является основным компонентом (до 99 %), а твердых веществ содержится около 1 %. В бытовых сточных водах содержание органических загрязнений, находящихся в растворенном состоянии, оценивается значениями БПК 100-400 мг/л и ХПК 150-600 мг/л, то есть их можно оценить как весьма загрязнённые. Общих взвешенных веществ (ОВВ) содержится в среднем 100-350 мг/л, а значения рН среды между 6,9-7,3. Имеются большие колебания этих значений, что зависит от региона и сезона. Сточные воды способны быстро загнивать через 12-24 часов при температуре 20°C. Низкое или полное отсутствие содержания кислорода в сточных водах приводит к анаэробному разложению органического вещества и выделению неприятно пахнущих газов – сероводорода, метана и др. В сточных водах содержание азотсодержащих (N) и фосфорсодержащих (P) соединений является очень высоким, а также в них имеются тяжелые металлы (ТМ), например, кадмий (Cd) и высокая численность колиформенных бактерий. При высоких уровнях в содержании ОВВ, БПК и питательных веществ зачастую приводит к повышенным уровням анаэробного микробиоценоза в осадках сточных вод.

Средние значения БПК в бытовых сточных водах колеблются между 200-400 мг/л, ХПК между 116-285 мг/л, общего количества взвешенных веществ 300-350 мг/л, а значения рН среды 6,9-7,3. Имеются большие колебания этих значений, что зависит от региона, скорости потока и сезона. Сточные воды промышленных районов могут иметь очень высокие значения

ХПК, очень низкие или высокие значения рН среды, что является результатом смешивания бытовых и промышленных сточных вод. После обработки сточных вод нормальными показателями считаются по БПК₅ 1-15 мг/л, ХПК - 60-70 мг/л, содержание ОВВ - 20-30 мг/л, а значение рН среды около 7,0.

1.1.3. Промышленные сточные воды

Также было показано, что технологию вермифльтрации возможно использовать для переработки сточных вод сельского хозяйства и животноводства, а также пищевой промышленности, перерабатывающей фруктовые соки, пивоваренных заводов, молочных ферм и молокозаводов, скотобоен и т. д. Они несут в себе, как правило, высокие нагрузки по таким основным показателям для сточных вод как БПК₅, ХПК, а также ОВВ и мутность (Sinha, Valani, 2011).

1.2. Вермифльтрация – основы технологии

Процесс вермифльтрация, как и процесс вермикомпостирования являются по своей сути природными процессами управления органическими отходами, которые основаны на использовании популяции дождевых (компостных) червей. Основное различие между этими двумя процессами состоит в том, что системы вермифльтрации способны утилизировать и жидкие, и твердые органосодержащие отходы, в то время как системы вермикомпостирования, в основном, относятся к утилизации твердых органосодержащих отходов (Мельник и др., 2015; Стом и др., 2012; Титов, 2008; Титов 2012; Edwards et al., 2011).

Технология вермифльтрации является относительно новым биологическим методом очистки сточных вод, в котором сочетается

традиционный процесс биофильтрации с технологией вермикомпостирования, то есть совместное использование микробиоценоза аэробных почвенных микроорганизмов в составе биофильтра и популяции компостных червей в составе системы вермифильтра (Мельник и др., 2015; Титов, 2013).

Известные типы технологии биофильтрации: капельные и дисковые биофильтры являются высоко энергетически затратными, дорогостоящими в их установке и обслуживании. Поэтому существует постоянная потребность в разработке технологии очистки сточных вод более просто и экономично. В связи с этим альтернативой является процесс вермифильтрации, который осуществляется в одном реакторе и сочетает в себе все три механизма очистки воды: биологические, химические и физические.

Основным недостатком технологии биофильтрации при очистке сточных вод является заиливание системы, в связи с чем уменьшается удельная площадь поверхности биофильтра и ухудшается, как правило, очистка сточных вод, что приводит к образованию микро- и макрозон анаэробного разложения образованной биоплёнки на матрице биофильтра и вторичному загрязнению очищенной воды. Это требует частую очистку или замену самого биофильтра.

Добавление в систему биофильтра верхнего фильтрующего слоя субстрата, содержащего популяцию компостных червей (вермифильтр), устраняет этот недостаток. Компостные черви способны работать, как биофильтры, так как они поглощают органические и неорганические вещества из сточных вод, в том числе и илистую фракцию сточных вод, переваривают их и выделяют в виде своих экскрементов (копролитов) в верхний слой системы. Более того, выделенные в верхний слой вермифильтра копролиты компостных червей представляют собой гранулы, обладающие водопрочностью, и поэтому верхний слой вермифильтрационной установки не заиливается и обладает хорошей фильтрующей способностью для жидкой фазы сточных вод. Затем жидкая

фракция поступает в ниже лежащие фильтрующие слои биофильтра, которые предварительно обрастают биоплёнкой из аэробных микроорганизмов, которые осуществляют окончательную очистку сточных вод (Ghatnekar et al., 1994; Manyuchi et al., 2013; Sinha et al., 2008; Sinha, Valani, 2011; Taylor et al., 2003).

Органические твердые частицы, которые отфильтровываются из поступающих сточных вод верхним слоем вермикультуры компостных червей, подвергаются биodeградации в результате жизнедеятельности компостных червей и ассоциированных микроорганизмов в этих вермислоях при этом образуется слой гумусного материала (вермигумус), обогащенный органическими веществами. Образование и накопление вермигумуса в системе увеличивает пористость субстрата и гидравлическую проводимость верхнего слоя вермифильтра, а также увеличивает площадь поверхности частиц, приводит к повышенной адсорбции загрязняющих веществ органической и неорганической природы (Taylor et al., 2003).

Дождевые черви также способны биоаккумулировать многие токсические химические вещества, включая тяжелые металлы, биотрансформировать их и биodeградировать токсичную органику с помощью ферментативных активностей. Тяжелые металлы связываются с помощью специальных белков, называемых металлотионеинами, которые находятся в тканях дождевых червей. Хлорогенные клетки дождевых червей, по-видимому, в основном накапливают тяжелые металлы и осуществляют их иммобилизацию в малых сферических хлорогосомах и мусорных везикулах, которые имеются в клетках. Дождевые черви способны лизировать или убивать болезнетворные микроорганизмы, находящиеся в сточных водах, так как их целомическая жидкость обладает антимикробными активностями. Очищенная вода становится детоксифицированной и дезинфицированной и достаточно чистой, чтобы быть повторно использованной для не питьевой цели, например, мойка, чистка, промышленного применения и для сельскохозяйственной ирригации,

поскольку она весьма питательна и обогащена макро- и микроэлементами (Sinha, Valani, 2011; Sinha et al., 2012; Sinha et al., 2014; Titov, Fatah, 2015).

Активность компостных червей в верхнем слое вермифильтра при поступлении отходов создает воздушные пространства в результате их миграции внутри вермислоя и способствует перемещению и перемешиванию субстрата в нём, создавая аэробные условия и делая кислород, доступным для аэробных микроорганизмов-компостёров, что существенно ускоряет биологическое разложение отходов. Аэробные процессы биоразложения органических веществ становятся более быстрыми, чем анаэробные процессы биоразложения органических веществ (Титов, 2012; Sinha, Valani, 2011; Sinha et al., 2008; Sinha et al., 2012).

При такой переработке сточных вод происходит более полная утилизация органических и неорганических веществ, находящихся в сточных водах, их дезинфекция и детоксикация. При этом технология вермифильтрации позволяет получать из сточных вод три хозяйственно полезных конечных продукта: вермикомпост (органическое высокогумусированное удобрение), биомассу дождевых червей (сырьё для кормовой и фармацевтической промышленности) и очищенную воду, которая может повторно использоваться для ирригации в сельском хозяйстве и различных технических целей (Титов, 2012; Sinha, Valani, 2011; Sinha et al., 2012).

1.2.1. Механизмы действия дождевых червей

Технология вермифильтрации является инновационной технологией «два в одном» и удачно сочетает в себе два широко известных биологических аэробных процесса: вермикомпостирование и традиционную биофильтрацию, и поэтому эту технологию можно назвать более точно, как вермибиофильтрация. Вермикомпостирование органических примесей, находящихся в сточных водах, осуществляется в результате присутствия в

системе популяции компостных червей. А биodeградация и окисление загрязняющих соединений, остающихся после прохождения сточных вод через слой вермифилтра, происходят в результате активности почвенных микроорганизмов или микрокосма, иммобилизованного на поверхности носителей биофилтра и образующих так называемые биоплёнки (Sinha, Valani, 2011).

Таким образом, эти два биологических аэробных процесса дополняют и усиливают эффективность удаления различных органических и неорганических поллютантов из сточных вод.

Субстрат вермифилтра обладает большой удельной поверхностью до 800 м²/г, а пустой объём достигает до 60 %. Растворённые органические вещества, коллоиды и взвешенные твердые частицы проникают с жидкостью в верхний слой вермифилтра, поглощаются и перерабатываются с помощью компостных червей, а также почвенными микроорганизмами, иммобилизованными на частицах субстрата вермифилтра. В данном случае в зоне вермифилтра происходят те же самые природные процессы, которые имеют место в живом почвенном слое, обильно населённом дождевыми червями и аэробными почвенными микроорганизмами (Sinha, Valani, 2011).

Компостные черви, инокулированные в верхний слой вермифилтра, поглощают органические и неорганические поллютанты из окружающей его среды, переваривают в желудочно-кишечном тракте и выделяют экскременты (копролиты), которые представляют собой органическое удобрение вермикомпост. Также в этом процессе не образуются неприятные запахи, потому что компостные черви создают аэробные условия в субстрате обитания с помощью своей роющей деятельности, что подавляет активность анаэробных почвенных микроорганизмов, которые способны выделять зловонные газы (Sinha et al., 2008). Компостные черви, поглощая с кормом содержащиеся в нём различные группы микроорганизмов, способны осуществлять в своём желудочно-кишечном тракте, как в биореакторе, селекцию и активизацию культур эффективных аэробных микробов-

деструкторов (Xing et al., 2005).

Дождевые черви также измельчают поглощенные частицы ила и песка, и, таким образом, увеличивая удельную общую площадь поверхности, что усиливает адсорбирующую способность органики и неорганики сточных вод, проходящих через него (Мельник и др., 2015; Стом и др., 2012; Титов, 2008; Титов 2012).

Жизнедеятельность компостных червей способствует удалению из сточных вод илистой и глинистой фракций, выделяя их в составе гранулированного копролита, что существенно увеличивает «гидравлическую проводимость» всей системы (Sinha, Valani, 2011).

Гуминовые вещества и лигнины, содержащиеся в копролите дождевого червя, адсорбируют и связывают тяжёлые металлы, что существенно снижает их токсичность (Sinha, Valani, 2011).

Растворённые и суспендированные органические и неорганические вещества адсорбируются и стабилизируются в результате сложных процессов биodeградации, которые имеют место в «живой почве», населённой дождевыми червями и аэробными микроорганизмами. Интенсификация почвенных процессов и аэрирование субстрата обитания в результате роющей активности дождевых червей запускает систему стабилизации почвы и фильтрации, делая её более эффективной.

Вермикомпост, продуцируемый дождевыми червями в слое вермифилтра в результате поглощения, переваривания осадков сточных вод и их выделения в виде копролитов, создаёт активно работающую зону, в которой происходит адсорбция, трансформация и обезвреживание тяжёлых металлов и поллютантов из сточных вод. Это происходит в результате присутствия гидрофильных групп содержащегося лигнина и гумуса в вермикомпосте. Копролиты дождевых червей также обладают прекрасной гидравлической проводимостью песка, а также высокой адсорбционной ёмкостью глины (Bhawalkar, 1995).

Полученная таким способом вермифильтрованная вода становится

достаточно чистой, чтобы повторно использовать для ирригации в парках и садах или для каких-либо технических целей, например, на животноводческих фермах.

1.2.2. Системы вермифiltrации

Системы вермифiltrации для очистки сточных вод, применяемые различными исследователями и компаниями в различных странах, имеют различия в конструкции, но для этого не требуется сложное и дорогостоящее оборудование. В большинстве случаев установка для вермифiltrации сточных вод может представлять собой какую-нибудь ёмкость, в которой основной объём (до 90%) занимает твердый носитель для биофильтра (гравий различного размера, песок, опилки, древесная щепа и кора), над которым размещается на сетке слой садовой земли (до 10%), куда заселяют популяцию компостных червей. Этот верхний слой вермикультуры и есть собственно вермифiltrрующий слой (Sinha, Valani, 2011).

Биологический фильтр – это установка для очистки сточных вод, заполненная загрузочным материалом, через который фильтруется сточная вода, и на поверхности которого развивается биологическая пленка, образованная при колонизации микроорганизмами. Основой биофильтра могут быть различные материалы-носители для биоплёнок: древесные стружки, щепа, опилки и измельченная кора деревьев, крупный песок, керамзит, щебень, гравий, кокс, а также пористые материалы (шлак, пемза) плотностью 500–1500 кг/м³ и пористостью 40–50%, кольца Рашига или коммерческие пластиковые элементы, производимые различными компаниями.

Сточные воды предварительно пропускаются через 2 мм сито для удаления твёрдой фракции и поступают в накопительную ёмкость. Наличие накопительной ёмкости имеет большое значение, так как из неё возможна подача потока сточных вод с определенной скоростью через форсунки на

поверхность вермифилтрирующего слоя. Эта жидкость просачивается под действием силы тяжести через слой вермифильтра, затем через слой биофилтра и, наконец, очищенная вода

собирается на дне устройства и удаляется из установки. Схема технологии вермифильтрации для очистки сточных вод представлена на рис.1.

В качестве примера представляем описание пилотной установки по вермифильтрации сточных вод (рис. 2-6), которая использовалась в научных исследованиях профессора Раджива Кумара Синха (Rajiv Kumar Sinha), который является известным австралийским исследователем-вермикультуристом в мире. В настоящее время он является консультантом по экологии и вермикультуре и научным руководителем Чаротарского университета науки и технологии (Гуджарат, Индия) и научным консультантом индийской компании Transchem Agritech Ltd (<http://www.transchem.in>) и австралийской компании VERMIBIOTECH, которые имеют большой практический опыт в разработке промышленных установок для вермифильтрации сточных вод в некоторых странах мира.

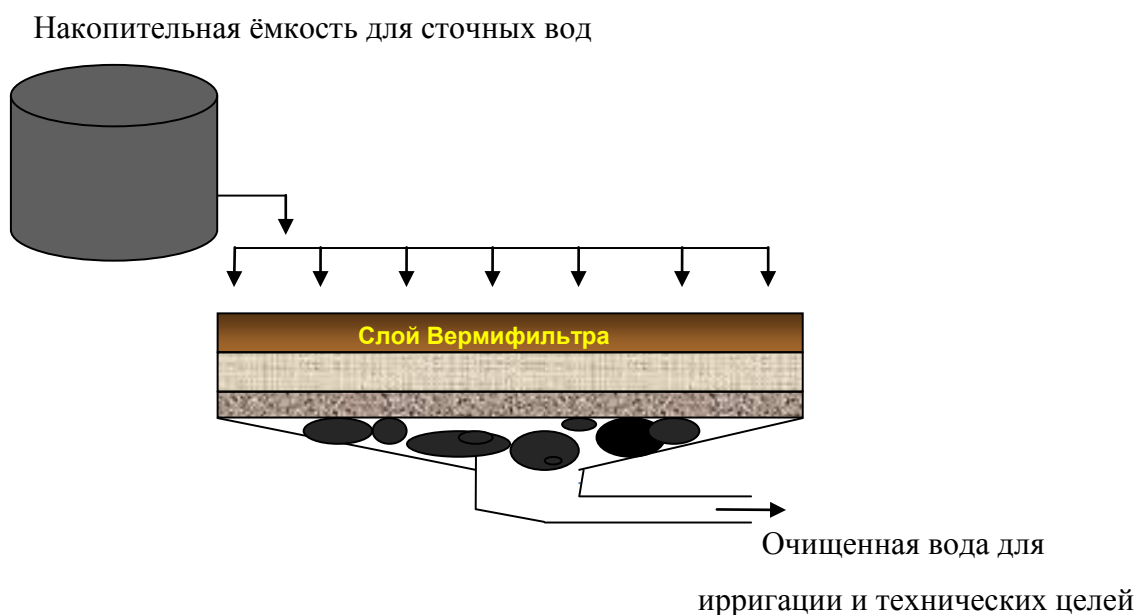


Рис. 1 – Схема вермифильтрационной установки для очистки сточных вод (Sinha, 2012).

Синха с сотрудниками (Sinha et al., 2008) изучали вермифiltrацию сточных вод станции очистки сточных вод (г. Брисбейн, Австралия). Такая система вермифiltrации с использованием дождевых червей в составе вермифiltrата при совместном взаимодействии почвенных микроорганизмов и микроорганизмов, иммобилизованных на материалах-носителях биофилтра, способна в результате различных механизмов поглощения, биodeградации и окисления эффективно удалять из сточных вод органические и неорганические загрязнители по таким важнейшим показателям качества воды как БПК₅ более, чем на 90%, ХПК — на 80-90%, растворённые вещества на 90-92% и взвешенные вещества на 90-95%.

Установка по вермифiltrации сточных вод (рис. 2-6), описанная Синхом с сотрудниками (Sinha et al., 2012), содержала около 30-40 кг гравия со слоем садовой почвы на верху. Этот слой почвы формирует слой вермифiltrата. Установка имеет поддон для сбора фильтрованной воды на дне в камере, который снабжен краном для удаления жидкости. Над камерой имеется проволочная сетка для поддержания слоёв гравия. На неё помещают слой гравия размером около 7,5 см, высотой до 25 см. Следующий 25-см слой состоял из гравия размером 3,5-4,5 см. Третий слой содержал мелкий гравий размером 10-12 мм, смешанный с песком, и имел высоту до 20 см. Самый верхний слой установки представлял собой 10-см слой садовой почвы. В него заселяли предварительно популяцию дождевых червей. После заселения популяции дождевых червей необходимо дать время (1-2 недели) для акклиматизации в новой среде. Так как дождевые черви играют важную роль в очистке сточных вод, то их количество и плотность популяции (биомасса) в субстрате, зрелость и здоровье являются важными факторами. В данных экспериментах стартовая популяция составляла 500 особей в объёме 0,025 м³, что равнялось 20 000 компостных червей в 1 м³ почвы.

В качестве вермикультуры была использована смесь трёх видов компостных червей *Eisenia fetida*, *Perionix excavatus* и *Eudrilus euginae*. В опытах производили очистку муниципальных сточных вод очистных

сооружений Оксли пригорода Брисбейна (Австралия).



Рис. 2 – Лабораторная установка для вермифiltrации сточных вод с регулируемым потоком жидкости из канистры (Sinha, 2012).



Рис. 3.



Рис. 4.



Рис. 5.

Рис. 3, 4, 5 – Для приготовления слоёв биофильтра в системе вермифильтра использовался гравий различного размера (Sinha, 2012).



Рис. 6 – Слой почвы с дождевыми червями и устройство для подачи сточной воды через перфорированные ПВХ-трубки (Sinha, 2012).

1.3. Ключевые факторы, влияющие на процесс вермифильтрации

Ряд факторов, которые являются критическими при очистке сточных вод с помощью технологии вермифильтрации, влияют на производительность и эффективность работы системы вермифильтрации. Ключевыми факторами являются виды компостных червей и их биомасса, гидравлическое время удерживания, гидравлическая нагрузка и проводимость, а также состав и характеристики сточных вод. Они коротко рассматриваются ниже.

1.3.1. Виды дождевых червей, подходящие для вермифильтрации

Различные виды дождевых червей имеют различные характеристики своей роющей активности и, поэтому по-разному влияют на процесс переработки отходов. Дождевые черви-анецики делают постоянные вертикальные норы в глубоких слоях субстрата, создавая пути потоков, которые могут снизить эффективность очистки за счет уменьшения контакта

сточных вод с матрицей фильтра. Дождевые черви-эндогеики делают обширные непостоянные горизонтальные норки, которые могут усиливать очистку сточных вод путем распределения выходящего эфлюента по большей площади. Третья категория видов-эпигеиков компостных червей (*E. fetida*, *E. andrei* и *Perionyx excavatus*) является критической для биodeградации осадков сточных вод, потому что им нравятся богатые органические субстраты по сравнению с другими видами и они, как правило, используются для вермикомпостирования различных видов органических отходов, включая осадки сточных вод (Титов, 2012; Sinha et al., 2008). Хотя компостные черви вида *E. fetida* широко используются, но черви вида *P. excavatus* обладают более высокой скоростью размножения, обеспечивая более быструю стабилизацию органических отходов, и производят больше копролита, который используется также для биофильтрации сточных вод и трансформации органического вещества (Taylor et al., 2003).

1.3.2. Численность популяции компостных червей

Поскольку компостные черви играют ключевую роль в очистке сточных вод в установке по вермифильтрации, то их численность и плотность популяции (биомасса) в слое вермифильтра, а также их активность жизнедеятельности являются важными факторами. Считается, что численность в 8-10 тысяч взрослых половозрелых особей на 1 м² почвы - субстрата обитания, который является вермифильтрующим слоем или зоной, что составляет около 8-10 кг биомассы червей в 1 м³ почвы, является оптимальным для эффективного функционирования системы вермифильтрации (Sinha, Vilani, 2011). После ввода в эксплуатацию вермифильтрационной установки численность популяции компостных червей может колебаться. Значительное снижение численности популяции компостных червей может означать, что условия окружающей среды в системе очистки сточных вод не являются идеальными. Чтобы система

оставалась стабильной популяция компостных червей должна состоять из взрослых особей, ювенилов, подростков и коконов.

Плотность популяции, зрелость и здоровье компостных червей в вермифильтрующем слое влияют на процесс очистки сточных вод. Оптимальная плотность компостных червей является одним из важных параметров для эффективного функционирования системы вермифильтрации (Li et al., 2008). Эффективность очистки вермифильтрацией положительно влияет на количество компостных червей на единицу площади в слое вермифилтра. Систему вермифильтрации следует начинать с достаточным количеством компостных червей, чтобы вермикомпост впитывал отходы и создавался подходящий гумусный фильтр.

Недавние исследования показали, что, возможно, количество компостных червей, инокулированных в вермифильтрующую систему, может быть не критичным, если происходит обработка неконцентрированных сточных вод, так как популяция компостных червей может приспособиться в соответствии с поступающими отходами. Например, исследования процесса вермифильтрации сточных вод при стартовой численности популяции 3000 особей/м² возросла до 12000 особей/м² в конце исследования. Однако, следует отметить, если входящие в систему вермифильтрации сточные воды имеют высокое содержание органических веществ и объем превышающий тот, который компостные черви могут переработать или, если компостные черви не смогут увеличить численность своей популяции в течение короткого периода времени, то система вермифильтрации может прекратить работу, что может привести к неудаче (Krishnasamy et al., 2013).

1.3.3. Аэробность системы

Дождевые черви - это аэробные организмы, которым требуется кислород для выживания и процветания в среде их обитания. Очень важно, чтобы в зоне вермифилтра не создавались анаэробные участки, так как в них

черви будут погибать, и аэробные процессы переработки органики прекратятся. Ферментация в аэробных условиях происходит значительно быстрее, чем таковая в анаэробных условиях, и без образования неприятных запахов. Прекращение аэробных процессов также приводит к снижению эффективности очистки стоков, что может переполнить систему и прекратить её работу. Это потребует остановки, разборки системы, очистки и повторной сборки установки.

1.3.4. Качество сточных вод

Бытовые сточные воды содержат в себе различные группы загрязняющих веществ, в том числе моющие средства, пищевые отходы, нефтепродукты и т. д. Состав и характеристики сточных вод могут существенно влиять на рост, размножение и активность популяции компостных червей и могут ограничивать процесс их обработки вермифильтрацией (Hughes et al., 2007). Токсичность различных компонентов и их пороговые концентрации до сих пор широко не изучены. Хьюз с сотрудниками (Hughes et al., 2008) изучали влияние аммонийных и натриевых солей, которые ограничивают производительность системы вермифильтрации. Исследования показали, что хлорид натрия является одним из наиболее токсичным из соединений натрия в сточных водах. Некоторые виды червей, например *E. fetida* могут быть устойчивыми к токсичным соединениям. Присутствие высоких концентраций солей подавляет рост дождевых червей, что, в свою очередь, существенно снижает эффективность работы вермифилтра. Было установлено, что при одинаковых концентрациях хлористый натрий (NaCl) был более токсичным для дождевых червей вида *E. fetida*, чем сульфат натрия (Na_2SO_4). Исследования также показали, что дождевые черви обладают способностью детоксицировать NaCl , хотя при этом репродуктивная способность червей нарушалась, если черви подвергались воздействию умеренных концентраций NaCl в течение

продолжительного периода времени. Наиболее чувствительными к NaCl были ювенильные особи дождевых червей. Однако фактический риск от токсичности NaCl в процессе вермифильтрации был низким (Hughes et al., 2009).

Также известно, что в тканях дождевых червей имеются белки, так называемые металлотионеины, которые способны связываться с тяжёлыми металлами, и последние становятся либо биологически неактивными, либо менее токсичными.

Дождевые черви могут быть устойчивыми в довольно широком диапазоне значений pH среды от 4,5 до 9,0. Оптимальные значения pH среды обитания для дождевых червей около 7,0. Значение pH сточных вод влияет на выживание и активность компостных червей. В исследованиях Хьюза с сотрудниками было установлено, что компостные черви видов *E. fetida* и *E. andrei* могут выживать значениях pH среды между 6,2 и 9,7 при ухудшении состояния ювенилов как при высоких, так и низких значениях pH (Hughes et al., 2007).

Окислительно-восстановительный потенциал сточных вод также имеет важное значение в эффективной работе системы вермифильтрации (Philippe et al., 2006). Его значение должно оставаться положительным, чтобы поддерживать популяцию компостных червей, так как черви не могут выживать в условиях с низкой доступностью кислорода в течение длительного периода времени.

1.3.5. Выбор фильтрующей среды

Садовая почва в определённом количестве должна быть использована в качестве субстрата обитания дождевых червей в установке по вермифильтрации. Кроме того, она является наиболее подходящим субстратом для нитрифицирующих бактериальных сообществ (*Nitrobacteraceae*, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*), которые окисляют аммиак,

образующийся в процессе гниения органических веществ, до нитритов и нитратов (Wang et al., 2011). Различные исследователи использовали разнообразные материалы для биофильтра в составе установки по вермифильтрации для понимания потенциального воздействия их физических характеристик на общую производительность вермифильтра. Использование угольной золы приводило к снижению содержания фосфора (Wang et al., 2010). Использование гравия было эффективно для очистки бытовых сточных вод (Kharwade & Khedikar, 2011). Было показано, что использование в биофильтре гравия размером 60 мм и 10 мм непосредственно влияет на активность микроорганизмов и скорость потока сточных вод через вермифильтр. Кварцевый песок и керамзит как основа биофильтра были использованы для очистки бытовых сточных вод и показали положительное воздействие на производительность вермифильтра (Liu et al., 2009; Xing et al., 2010). Однако керамзит давал лучшие результаты по сравнению с кварцевым песком, что делает его более подходящей средой (Xing et al., 2011).

1.3.6. Время гидравлического удерживания

Время гидравлического удерживания или время пребывания (HRT) представляет собой среднее время задержки сточных вод в системе очистки вермифильтрацией. Значение HRT является важным фактором в очистке сточных вод в системе вермифильтрации, где компостные черви совместно с ассоциированным микрокосмом и другими фильтрующими материалами преобразуют и стабилизируют питательные вещества, взвешенные вещества и показатели БПК и ХПК сточных вод. Тем не менее, большая часть твердых веществ и некоторых питательных веществ будут находиться в системе в течение более продолжительного времени, что способствует их более полной биodeградации. Эффективность очистки системы повышается при увеличении показателя HRT. Значение HRT системы вермифильтрации может

быть рассчитано по уравнению (Sinha et al., 2008):

$$HRT = (\rho \times V_s) / Q_w$$

где:

HRT - время гидравлического удерживания (час);

V_s - объём вермифилтра (m^3);

ρ - порозность слоя вермифилтра;

Q_w - скорость потока сточных вод через слой вермифилтра ($m^3/час$).

Таким образом, гидравлическое время удерживания прямо пропорционально объёму слоя вермифилтра и обратно пропорционально скорости потока сточных вод через слой вермифилтра.

Это очень важный параметр при очистке сточных с помощью вермифилтрации и характеризуется определённым периодом пребывания растворённых веществ и суспендированных частиц потока стоков в слое вермифилтра, то есть время их контакта с популяцией вермикультуры и сообществом почвенных микроорганизмов. Время гидравлического удерживания зависит от скорости потока сточных вод через блок вермифилтрации, объёма использованной почвы и её качества, а также численности популяции компостных червей и их активности. За этот период компостные черви совместно с сообществом почвенных микроорганизмов должны осуществить комплекс физических и биохимических процессов для удаления питательных веществ и, в конечном счете, снизить показатели по БПК₅, ХПК и взвешенным частицам. Чем дольше сточные воды остаются в системе в контакте с компостными червями, тем эффективнее будет вермиобработка. Увеличение объёма почвенного профиля может повысить время гидравлического удерживания. Число живых взрослых особей компостных червей, функционирующих на единице площади вермифилтра может влиять на значение HRT. Для сточных вод, имеющих показатели БПК 200-400 мг/л, время гидравлического удерживания составляет всего 30-40 минут (Sinha et al., 2010). За этот период времени популяция компостных червей и почвенных микроорганизмов существенно снижают показатели по БПК₅, ХПК и

количество взвешенных частиц в потоке сточных вод. Тем не менее, для бытовых сточных вод рекомендуется увеличить время гидравлического удерживания от 1 до 2 часов. Это связано с необходимостью более полного удаления патогенных микроорганизмов, разложения токсичных химических веществ и снижения концентрации тяжелых металлов (Sinha, Herat et al., 2010).

Оптимальное значение HRT системы вермифильтрации может быть определено на основании данных по концентрации органических загрязняющих веществ в сточных водах. Система способна удалять высокие нагрузки по БПК₅ от 10 000 до 1 000 000 мг/л в сточных водах пищевой промышленности при значениях HRT в пределах 4-10 часов. Наиболее подходящие значения HRT для оптимального удаления БПК₅, ХПК, взвешенных веществ и мутности сточных вод пивоваренного завода при содержании всего 500 особей компостных червей в вермислое объёмом 0,032 м³ составляло 3-4 часа (Sinha et al., 2008), в то время как для сточных вод молокозавода оно составляло от 6 до 10 часов (Sinha et al., 2007). Компостные черви могут уменьшить небольшие БПК нагрузки сточных вод (200-400 мг/л) в течение 30-40 минут, а при высоких значениях БПК сточных вод в течение 1-2 часов (Sinha et al., 2008). Тем не менее, в некоторых случаях оптимальные значения HRT могут варьировать от шести до девяти часов при очистке сточных вод (Xing et al., 2005). Оптимальные значения HRT могут варьировать в зависимости от конструкции системы вермифильтрации.

1.3.7. Скорость гидравлической нагрузки

Скорость гидравлической загрузки (HLR) определяется как скорость, с которой сточные воды поступают в систему вермифильтрации, и выражается в м³ потока на м² поверхности вермифильтра в час. Значения HLR зависят от нескольких факторов, таких как структура, объемная плотность, качество сточных вод, профиль аэрации и метода внесения эфлюента. В системе

вермифльтрации значение HLR представляет собой объём сточных вод, который может быть обработан в достаточной степени в данный момент времени. Скорость гидравлической загрузки системы вермифльтрации может быть рассчитана по формуле (Sinha et al., 2008):

$$HLR = V_w / (A \times t)$$

где:

HLR - гидравлическая нагрузка ($\text{м}^3/\text{м}^2/\text{час}$);

V_w - скорость потока сточных вод (м^3);

A - площадь вермифилтра (м^2);

t - время, необходимое для прохождения сточных вод через слой вермифилтра (час).

Скорость гидравлической нагрузки является важным показателем, чтобы поддерживать оптимальные уровни температуры, аэробности и влажности в системе вермифилтра. Она должна учитываться на стадии разработки конструкции вермифилтрационной установки. Показано, что увеличение гидравлической нагрузки при вермифилтрации сточных вод приводило к снижению эффективности их очистки и уменьшению численности популяции взрослых особей компостных червей в слое вермифилтра (Xing et al., 2010).

1.3.8. Удаление органики (БПК₅ и ХПК)

Удаление органических загрязнителей (снижение показателей БПК₅ и ХПК) и взвешенных веществ происходит обычно более эффективно в системе вермифилтрации (таблица 1), в основном, за счет способности компостных червей поглощать и переваривать растворимые и твёрдые частицы и перерабатывать их в вермигумус. Более того, не растворимые вещества такие, как взвешенные твердые частицы в сточных водах, легче удаляются с помощью системы вермифилтрации. Взвешенные твердые частицы, такие как фекальные вещества и другие, легко поддающиеся биологическому разложению, органического вещества захватываются в

верхней части слоя вермифилтра, а затем перерабатываются компостными червями и микроорганизмами.

Таблица 1.

Сравнение показателей БПК₅, ХПК и содержания общих взвешенных веществ (ОВВ) в сточных водах после вермифльтрации (по Krishnasamy et al., 2013).

Авторы	Источник сточных вод	БПК ₅	ХПК	ВВ
Xing et al., 2005	Очистные сооружения	91-98	81-86	97-98
Chaudhari, 2006	Муниципальные	98-100	45	-
Sinha et al., 2007	Молокозавод	98	80-90	90-95
Yang et al., 2008	Очистные сооружения	86	72	88.5
Sinha et al., 2008b	Бытовые	90	80-90	90-95
Sinha et al., 2008b	Пивоварение	99	71	95-98
LIFE (2005)	Бытовые	97	75	94
Li et al., 2009	Очистные сооружения	89.3	83.5	89.1

1.4. Важные научные исследования по очистке сточных вод с помощью технологии вермифльтрации

Представляем в хронологическом порядке анализ доступных литературных научных данных по использованию технологии вермифльтрации для очистки сточных вод с использованием различных систем лабораторных пилотных установок.

Профессор Рой Хартенштайн с сотрудниками в США впервые в 1984 году показал, что дождевые (компостные) черви вида *Eisenia fetida* и африканский ночной выползок *Eudrillus eugeniae* могут успешно использоваться в составе капельных биофильтров, что существенно улучшало эффективность их работы при очистке сточных вод (Hartenstein и др., 1984). Затем Hartenstein и Bisesi (1989) показали, что использование дождевых червей для переработки сточных вод фермы по интенсивному разведению домашнего скота, которые содержали очень высокие нагрузки по БПК₅, общих взвешенных веществ, а также большие количества азотсодержащих и фосфорсодержащих веществ приводило к получению

чистой воды и высоко питательного органического удобрения вермикомпоста.

В.С. Баландин (1994) подал патентную заявку в Роспатент на изобретение «Фильтр для очистки жидкостей», в которой описывается устройство для очистки жидкостей от взвешенных примесей и предназначенное для улавливания взвешенных частиц, прежде всего, органического происхождения и превращения их в вермикомпост. Фильтр состоит из корпуса с вводом смеси, фильтрующего элемента, вывода очищенной жидкости и оснащён средствами удаления взвешенных частиц и очистителя фильтра. Для повышения потребительских свойств фильтра его корпус разделен на верхнюю, среднюю и нижнюю камеры.

Gardner с сотрудниками (1997) изучали локальную очистку сточных вод дождевыми червями и показали, что с помощью процесса вермифильтрации можно значительно снижать нагрузки по БПК и ХПК.

В своей докторской диссертации Г.А. Жариков (1998) предложил использовать для частичной предварительной очистки от органических загрязнений сточных вод Камского целлюлозно-бумажного комбината систему фильтра-накопителя-отстойника, которая была названа автором зоофильтром. В качестве фильтрующего материала использовалась древесная кора. Для улучшения условий фильтрации на дно лотка помещали слой гравия. Слой коры сверху прикрывали металлической решеткой для предотвращения размыва струей воды фильтрующего слоя и его всплывания. После заполнения первой секции фильтра лоток удлиняли таким образом, чтобы вода поступала во вторую секцию и т.д. В заиленную секцию фильтра помещали компостных червей в количестве 1-2 тысячи особей для очистки коры от органических включений. Этот способ сочетает механическую очистку сточных вод с частичной утилизацией осевших на коре загрязнений при помощи компостных червей. В дальнейшем заилившийся фильтрующий элемент зоофильтра поступал на окончательную переработку с помощью вермикомпостирования.

Чилийские исследователи Сото и Тоха (Soto & Toha, 1998) изучали вермифiltrацию муниципальных сточных вод на опытной установке. Система состояла из слоя камней на дне установки, слоя древесных опилок выше и слоя гумуса в 20-30 см наверху, который заселялся 5000-10000 половозрелых особей компостных червей вида *E.andrei* на м² вермифильтра. Было показано, что показатели в вермифильтрированной воде снижались по ХПК на 81-86%, по БПК₅ - на 99%, содержание ОВВ уменьшалось на 98%, общего азота N - на 89 %, а общего фосфора Р - на 70%. Кишечная палочка *E. coli* была удалена 1000-кратно. Такая система вермифiltrации была способна перерабатывать до 1000 л сточных вод на м² площади вермифильтра в день. Эти авторы запатентовали и коммерциализировали эту технологию в Чили.

Тэйлор с сотрудниками (2003) изучали переработку бытовых сточных вод, используя вермифiltrующий слой. Было показано, что при нагрузке 130 л/м² в день что дождевые черви могут уменьшить нагрузки по БПК₅ и ХПК, а также снижать содержание общих растворенных и суспендированных твердых частиц более, чем на 70-80 %. Условия окружающей среды в зоне вермифильтра оказались пригодны для популяции дождевых червей, обитающей в ней. Исследование выявило факторы, которые влияют на производительность и применение технологии вермифiltrации.

Bajsa с сотрудниками (Bajsa et al., 2003) также изучали вермифiltrацию бытовых сточных вод, используя вермикомпостирование дождевыми червями со значительными положительными результатами.

Пилотные исследования по вермифiltrации сточных вод были осуществлены Ксингом с сотрудниками (Xing et al., 2005) на станции очистки сточных вод в Шанхае (Китай). Установка по вермифiltrации имела размеры: 1 м (длина) x 1 м (ширина) x 1.6 м (высота), содержала в себе гранулированные материалы и вермифiltrующий слой с дождевыми червями. Численность дождевых червей была приблизительно около 8 000 червей/м². Средние значения ХПК исходных сточных вод составляли 408,8

мг/л, БПК₅ - 297 мг/л, ОВВ - 186,5 мг/л. Гидравлическое время удерживания сточных вод колебалось от 6 до 9 часов и гидравлической нагрузки от 2,0 до 3,0 м³/м² в день. Эффективность удаления ХПК была между 81-86 %, БПК₅ - между 91-98 %, а ОВВ - между 97-98 %.

Ли с сотрудниками (Li et al., 2008) разработали и испытали пилотную установку вермифильтрации для очистки сточных вод, образующихся при гидросмыве свиного навоза на свиноферме. Она представляла собой ёмкость размером 5,0 × 2,5 м с решетчатым дном, в которой находился работающий слой вермифилтра высотой до 1 м, поддерживаемый нетканой синтетической тканью (рис. 7).

Вермифильтрующий слой состоял из смеси древесной щепы (одна треть от общей массы) и субстрата с компостными червями вида *Eisenia andrei* (две трети от общей массы), который был предварительно приготовлен из древесной коры и щепы, торфа, соломы и вермикомпоста. Сточные воды, прошедшие через сито, для отделения твёрдой фракции свиного навоза, накапливались в резервуаре, а затем распылялись на поверхность вермифилтра. Популяция компостных червей увеличивалась на 30% в течение 4-х недель в результате акклиматизации вермикультуры. Численность популяции компостных червей достигала до 20 000 особей/м³ вермифилтра. Было показано, что обработка сточных вод с помощью технологии вермифильтрации сокращала выброс аммиака на 50%.

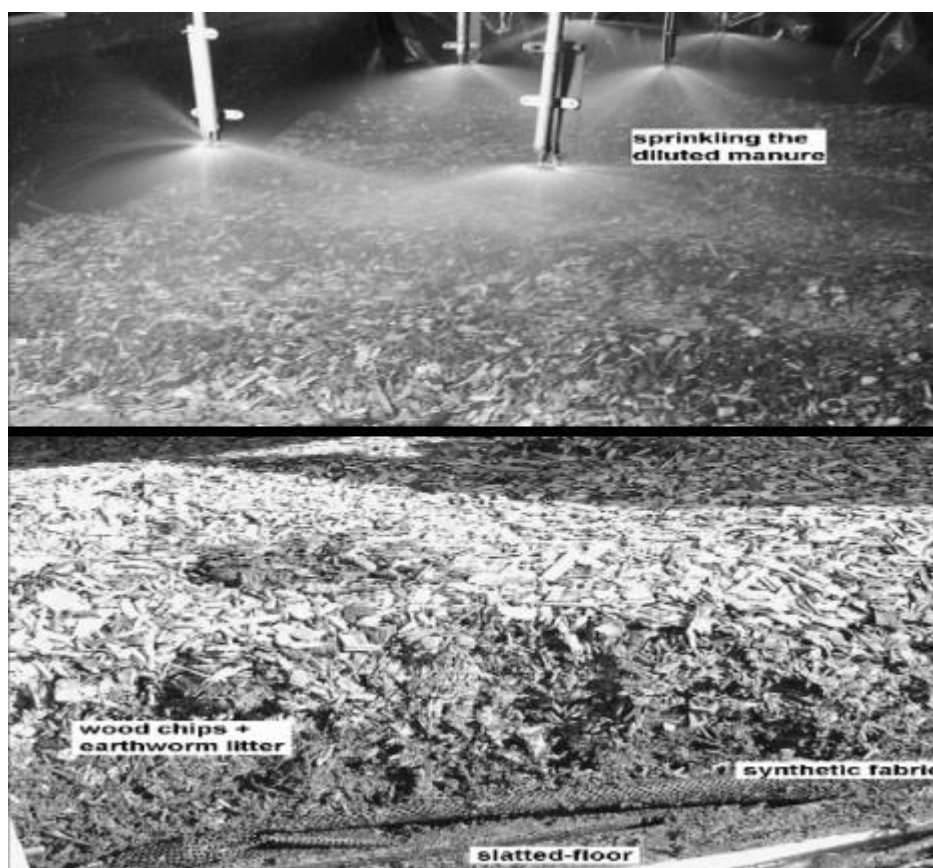


Рис. 7 – Устройство для вермифильтрации сточных вод (Li et al., 2008).

Авторы считают, что технология вермифильтрации может быть использована для рециклинга сточных вод на свинофермах. Очищенные сточные воды могут быть повторно использованы, а биомасса компостных червей и вермикомпост могут быть проданы, чтобы компенсировать стоимость очистки сточных вод и уменьшить объёмы навоза на ферме. Твёрдая фракция сточных вод, собранная на сите, может быть компостирована или вермикомпостирована для дальнейшего использования в качестве органических удобрений.

Янг с сотрудниками (Yang et al., 2009a) изучали эколого-физиологическую адаптацию компостных червей в слое вермифильтра при различных гидравлических нагрузках. Показано, что гидравлическая нагрузка от 2,4 до 6,0 м³ сточных вод на м² в день слабо влияла на плотность и биомассу дождевых червей. Однако при гидравлической нагрузке до 6,7 м³/м² в сутки численность дождевых червей уменьшалось на одну треть и у

них нарушались дыхательные функции. Авторы считают для того, чтобы поддерживать хорошую среду обитания в зоне вермифилтра для компостных червей и обеспечивать их функционирование, гидравлическая нагрузка на вермифилтр не должна превышать $6,7 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в сутки.

Янг и сотрудники (Yang et al., 2009b) исследовали производительность установки по вермифилтрации сточных вод в зимний период. Было показано, что температура в области вермифилтра зимой была на $1-5^\circ \text{C}$ выше, чем в окружающей среде. Тем не менее, температура это один из ключевых факторов для процесса вермифилтрации, так как при понижении температуры снижается активность компостных червей. Температура фильтрующего слоя положительно коррелировала с плотностью популяции компостных червей в нём. Способность компостных червей к поглощению и перевариванию органических отходов сточных вод в зимний период составляла около $1/3$ от таковой в летний период при одинаковой гидравлической нагрузке. Более того, скорость удаления загрязняющих веществ, кроме БПК_5 при вермифилтрации стоков зимой была вдвое ниже таковой в летний период при одинаковой гидравлической нагрузке. Рекомендуется утепление установки по вермифилтрации в зимний период для поддержания оптимальной производительности.

Янг с сотрудниками (Yang et al., 2009c) показали, что после заселения популяции дождевых червей в зону вермифилтра её численность и биомасса имели тенденции к постепенному снижению. Но после адаптации дождевых червей и при повышении температуры численность и биомасса дождевых червей возрастали и спустя 58 дней распределение дождевых червей становится более равномерным и постоянным. Была обнаружена между плотностью популяции дождевых червей и влажностью значительная отрицательная корреляция. При температуре ниже 15°C , уровни дыхания дождевых червей значительно уменьшались, что не снижало эффективность очистки сточных вод.

Дхадзе с сотрудниками (Dhadse et al., 2009) изучали очистку сточных

вод фармацевтического предприятия, которые имели очень высокие показатели по ХПК (21960 - 26000 мг/л), БПК₅ (11200 - 15660 мг/л) и ОВВ (5460 - 7370 мг/л). Слой вермифильтра содержал в соотношении 1:1:1 почвы, песка и вермикопролит как матрикс с 24 взрослыми особями дождевых червей в каждом реакторе. ХПК удалялось на 85,44 - 94,48% и БПК₅ на 89,77 - 96,26% при 2-х дневном периоде времени гидравлического удержания. Тяжелые металлы также удалялись, а осадок при этом не образовывался.

Ванга с сотрудниками (Wanga et al., 2010) исследовали очистку бытовых сточных вод в сельской местности с помощью вермифiltrации, содержащую биофильтр на основе конверторного шлака и угольной золы. Результаты показали, что при гидравлической нагрузке стоков 4 м³/м²/сутки в среднем показатели ХПК, БПК₅, и содержание аммиачного азота и фосфора снижались на 78,0%, 98,4%, 90,3%, 62,4%, соответственно. Вермифiltrация была эффективной для удаления нерастворимых органических веществ и взвешенных веществ, а фильтр с конвертерным шлаком и угольной золой играет важную роль в удалении фосфора.

Лакшми с сотрудниками (Lakshmi et al., 2010) исследовали эффективность и производительность технологии вермифiltrации при очистке сточных бытовых вод из кухни хосписа для мальчиков в Бангалоре (Индия). Показано, что в среднем эффективность вермифильтра по удалению загрязнений из сточных вод была следующей: ХПК - 65%; БПК₅ - 92%; содержание общих растворенных твердых веществ снижалось на 90%; содержание ОВВ - на 88%, а мутность воды - на 93,2%. В процессе вермифiltrации не было образования осадка сточных вод, а вермифiltrованная вода была достаточно чистой, чтобы повторно использовать для орошения сельскохозяйственных угодий и садов.

Ванг с сотрудниками (Wang et al., 2011) изучали работу новой трехступенчатой башенной системы вермифiltrации с помощью дождевых червей вида *Eisenia fetida* для очистки сельских бытовых сточных вод в течение 4-х месячного периода. Среднее удаление ХПК составляло на 81,3%;

аммония на 98%; общего азота (нитраты) на 60,2% и общего фосфора на 98,4%.

Ксинг с сотрудниками (Xing et al., 2010) изучали очистку бытовых сточных вод с помощью системы вермифильтрации, упакованную кварцевым песком и керамзитом. Результаты показали, что вермифильтрация позволяет достичь хороших показателей. Так, показатели удаления ХПК составляли (47.3-64.7 %); БПК₅ (54.78-66.35 %); ОВВ (57.18-77.90 %); общего азота (7.63-14.90) и аммиачного азота (21.01-62.31), соответственно. Они также заключили, что существует тесная зависимость между динамикой популяции дождевых червей и активностями ферментов относительно уровней удаления БПК₅ и ХПК из бытовых сточных вод и что популяции более крупных дождевых червей (> 0.3 г) могут играть более положительную роль при переработке сточных вод вермифильтрацией по сравнению с мелкими дождевыми червями.

Томар и Сутар (Tomar, Suthar, 2011) продемонстрировали потенциал новой системы вермифильтрации с использованием компостных червей вида *Perionyx sansibaricus* для очистки городских сточных вод, которая позволяла существенно снизить уровни содержания растворённых веществ на 88,6%, ОВВ на 99,8%, нитратного азота на 92,7% и общего фосфора на 98,3%, а показатель ХПК на 90%.

Ли с сотрудниками (Li et al., 2011) разработали и провели испытание новой многослойной вермифильтрующей системы для очистки бытовых сточных вод для сельской местности. Было показано, что все показатели значений ХПК, БПК₅ и содержания ОВВ были выше 75%, 85% и 90%, но азотсодержащие и фосфорсодержащие соединения удалялись только частично. Авторы пришли к выводу, что эти предварительные результаты дают обнадеживающую перспективу для применения многослойной системы вермифильтрации для очистки бытовых сточных вод в сельской местности в будущем.

Азуар и Ибрахим (Azuar, Ibrahim, 2012) исследовали, какие

фильтрующие материалы лучше подходят для установки по вермифильтрации сточных вод предприятия по производству пальмового масла. В качестве вермикультуры использовали дождевых червей африканского ночного выползка *Eudrillus eugeniae*. Было показано, что строительный песок в качестве фильтрующего материала превосходил пальмовое волокно.

Малек с сотрудниками (Malek et al., 2012) изучали производительность системы вермифильтрации с использованием дождевых червей вида *Lumbricus rubellus* для очистки сточных вод завода по производству пальмового масла. Из результатов исследований ясно, что система вермифильтрации имеет более высокую производительность в получении очищенной воды. Показатели ХПК были снижены на 98%, а содержание ОВВ уменьшалось на 97%. Значение pH сточных вод повышалось с pH 5,5 до pH 8,0. Таким образом, авторы считают, что технология вермифильтрации для очистки сточных вод маслобойни является более эффективной, чем биофильтрация.

Маньючи и Фири (Manyuchi, Phiri, 2013) и Маньючи с соавторами (Manyuchi et al., 2013) изучали в лабораторных условиях возможность очистки муниципальных сточных вод (Хараре, Зимбабве) с помощью вермифильтрации. Для этого были использованы компостные черви вида *Eisenia fetida*. Было экспериментально показано, что вермифильтрация сточных вод позволяла снизить в них показатели БПК₅ на 98%, ХПК на 70%, содержание ОВВ на 95% и устранить мутность на 98%. Значение pH вермифильтрованной воды равнялось 7,0. Авторы рекомендуют данную технологию для очистки муниципальных сточных вод в развивающихся странах. Вермифильтрованная вода после обработки сточных вод соответствовала с установленным стандартом для поливной воды. Поэтому технология вермифильтрации может быть применена в качестве экологически безопасного способа для очистки сточных вод для ирригационных целей.

Ние с сотрудниками (Nie et al., 2013) представили систематическое изучение новой системы башенного биофильтра для очистки сточных вод в сельской местности Китая. Была определена оптимальная плотность дождевых червей в слое вермифильтра 12,5 г/л почвы и толщина почвенного слоя вермифильтра не более 40 см. Для более эффективного удаления из сточных вод азота и фосфора при одностадийном процессе вермифильтрации добавляли блок анаэробной биофильтрации для предварительной очистки стоков, а также заменили гравий на керамзит в биофильтре и вермибиофильтре. Была построена пилотная двубашенная система вермибиофильтра в г. Исин в провинции Цзянсу, которая показала хорошую производительность при очистке стоков по ХПК, удалению аммонийного азота и фосфора. Сравнительная оценка башенной системы вермибиофильтрации с другими традиционными технологиями очистки сточных вод показала, что башенная система вермибиофильтрации представляет собой универсальную систему, которая может эффективно работать по разумной стоимости в различных природных и социально-экономических условиях сельской местности Китая.

Большой вклад в разработку и внедрение технологии вермифильтрации для различных типов сточных вод в Австралии и Индии внесли работы профессора Раджива К. Синха (Rajiv K. Sinha) из университета Гриффита (г. Брисбен, Австралия) и научного консультанта компании «Вермибиотех» (Vermibiotech, Австралия) и компании TRANSCHEM Agritech Ltd. (Индия).

Синха с сотрудниками (Sinha et al., 2007) изучали очистку сточных вод пивоваренного завода и молокозавода с помощью вермифильтрации, которые имеют очень высокие показатели по БПК₅ и содержанию взвешенных веществ 6780 мг/л и 682 мг/л для стоков пивоваренного завода и 139 200 и 36 000 мг/л молокозавода, соответственно. Показано, что компостные черви в процессе вермифильтрации снижали показатели по БПК₅ на 99% и по взвешенным веществам более, чем на 98% в обоих

случаях. Время гидравлической задержки для сточных вод пивоваренного завода равнялось 3-4 часа и 6-10 часов для стоков молокозавода.

Синха и Бхарамбе (Sinha, Bharambe, 2007) также изучали вермифильтрацию сточных вод пивоварни и молокозавода, которые имеют очень высокие показатели БПК₅ и ОВВ нагрузки, например, 6780 мг/л и 682 мг/л (пивоварня) и 1,39,200 мг/л и 3,60,00 мг/л (молокозавод), соответственно. Было показано, что дождевые черви снижали высокие нагрузки БПК₅ на 99% в обоих случаях и ОВВ более чем на 98%. Но гидравлическое время удерживания HRT составляло 3-4 часов и 6-10 часов для сточных вод пивоварни и молокозавода, соответственно.

Важное наблюдение состояло в том, что несмотря на то, что значения БПК₅, ХПК и ОВВ из сточных вод значительно снижались с помощью контрольной системы (без дождевых червей), установка никогда не работала в течение более длительного времени и часто засорялась. Органические твердые вещества в сточных водах, накапливаются в слое почвы, а также подвергаются сильному инфицированию грибами. Это становится причиной засорения системы спустя некоторое время. В системе вермифильтрации дождевые черви постоянно поглощают и переваривают твердые частицы и грибки, поэтому система никогда не заиливается и эффективно функционирует.

Синха с сотрудниками (Sinha et al., 2012) изучали вермифильтрацию сточных вод, загрязнённых токсичными нефтепродуктами, полученных из автомобильного сервиса в Брисбене. Сточные воды были черно-коричневого цвета с резким запахом. Они содержали смесь алифатических и ароматических летучих нефтяных углеводородов (C₁₀-C₃₆) и хлорорганических соединений охлаждающих жидкостей, отработанных масел двигателя и трансмиссии, тормозной жидкости, смазки, пролитого бензина и дизельного топлива. Алифатическая фракция содержит большую часть нефтяных соединений, например, циклоалканы, а также сложную смесь насыщенных токсичных углеводородов. Ароматическая фракция, в основном,

содержала поверхностно-активные соединения и являлась более токсичной, чем алифатическая составляющая. Дождевые черви не только были толерантны и выживали в такой токсичной среде, но и также были способны осуществлять процессы биофильтрации и биоремедиации сточных вод, имеющих тёмно-коричневый цвет, и превращать её в светло-желтую по цвету и без запаха воду, что указывало удаление всех сложных углеводов.

Синха с сотрудниками (Sinha et al., 2013) осуществили инновационные исследования по очистке промышленных сточных вод предприятия по производству фруктовых соков. Пилотная вермифильтрующая установка содержала около 30-40 кг гравия и сверху 10-см слой садовой земли объёмом $0,032 \text{ м}^3$ с заселёнными компостными червями в количестве 500 взрослых и здоровых особей, который образовал вермифильтрующий слой. Самый нижний 25-см слой состоял из гравия размером 7,5 см, над ним 25-см слой гравия размером 3,5 - 4,5 см, затем 20-см гравия размером 10-12 мм в смеси с песком. Вермифильтрация снижала показатели по БПК₅ более чем на 99%, ХПК на 95%, уменьшала общее содержание растворенных веществ на 97%, общее содержание взвешенных твердых на 91% и мутность на 95%. Получаемая вермифильтрованная вода была чистой и прозрачной, а также содержала в себе питательные для растений вещества и могла использоваться повторно для ирригации.

И.Н. Титов и О.В. Ириков (2013) запатентовали в России способ очистки сточных вод с помощью технологии вермифильтрации, который отличается тем, что в системе вермифилтра, содержащей три слоя из камней размером до 7,5 см (высота слоя до 25 см), гравия размером до 4,5 см (высота слоя до 25 см) и мелкого гравия (10-12 мм) с кварцевым песком, заменяется на один слой из колец Рашига высотой 90 см. Пилотная установка усовершенствованной системы вермифильтрации для очистки сточных вод представляет собой коммерческую пластиковую ёмкость в 1 м^3 в металлической оплётке, заполненную кольцами Рашига высотой до 90 см, над которыми наслаивают слой садовой земли в 10 см, в который заселяют

популяцию компостных червей вида *Eisenia fetida* из расчета 10 кг биомассы компостных червей на 1 м³.

И.Н.Титов с сотрудниками (2013) запатентовал в республике Казахстан способ и установку для очистки сточных вод с помощью технологии вермифильтрации. Пилотная установка усовершенствованной системы вермифильтрации для очистки сточных вод представляет собой коммерческую пластиковую ёмкость в 1 м³ в металлической оплётке, заполненную снизу слоем камней размером до 7,5 см, высотой до 25 см, слоем гравия размером до 3,5 см, высотой до 25 см, над которыми наслаивается слой специально обработанного адсорбента (измельченного цеолита) в 10 см, над которым наслаивают слой садовой земли в 10 см, в который заселяют популяцию компостных червей вида *Eisenia fetida* из расчета 10 кг биомассы червей на куб.м. В другом варианте пилотной установки слой садовой земли в 10 см, в который заселяют популяцию компостных червей вида *Eisenia fetida* из расчета 10 кг биомассы червей на 1 м³, заменяется на слой компостированного коровьего навоза высотой 25-30 см, в который заселяют популяцию компостных червей вида *Eisenia fetida* из расчета 10 кг биомассы червей на 1 м³ субстрата.

Джоши с сотрудниками (Joshi et al., 2014) использовали пилотную установку, состоящую всего из трёх слоёв: гравия, песка и верхнего слоя почвы с дождевыми червями вида *Eisenia fetida* для очистки муниципальных сточных вод. Было показано в течение года, что данная установка эффективно работала и удаляла поллютанты на 94%, 70%, 93% и 97% по показателям ХПК, общего органического вещества, ОВВ и мутности, соответственно.

Хавьер с сотрудниками (Xavier et al., 2014) показали, что использование пилотной установки для очистки сточных вод молочной промышленности, содержащих высокое содержание органического вещества (2000 мг/л), а также общих растворённых и взвешенных веществ (1800 мг/л), позволило снизить в вермифильтрованных водах на 85-90% БПК₅, 75-80%

ХПК и 85-90% ОВВ по сравнению с контрольными опытами при отсутствии компостных червей вида *Eisenia fetida*. Считается, что вода после вермифiltrации становится достаточно чистой и дезинфицированной, чтобы повторно её использовать для орошения в парках и садах.

Адугна с сотрудниками (Adugna et al., 2014) изучали возможность технологии вермифiltrации для очистки сточных вод в жарком субэкваториальном климате Буркина-Фасо. Средние дневные минимальные и максимальные температуры составляют 16-32°C в январе и 26-42° С в апреле. Для этого были взяты пробы трущобных хозяйственных вод (кухонные и прачечные) пригорода Уагадугу. Пилотная установка содержала в себе слои гравия различного размера, песка и древесных опилок трех местных видов деревьев: *Khaya ivorensis*, *Mansonia altissima*, *Milicia excelsa*. В качестве вермикультуры использовали местную популяцию дождевых червей *Eudrilus eugeniae* при концентрации 6370 взрослых особей/м². Исследования проводились при температуре окружающей среды при гидравлической скорости нагрузки 64 и 191 л/ м²/сут. Показатели испытываемых сточных вод были по БПК₅ от 690 до 2200 мг/л, а значения pH колебалось от 4,7 до 7,32. Было показано, что местные дождевые черви вида *Eudrilus eugeniae* смогли выдерживать температуру выше 40°C и позволяли избежать образованию запахов и проблем с засорением самого вермифilterа. Эффективность очистки сточных по снижению показателей БПК₅, ХПК, содержанию общих взвешенных твердых частиц, титру кишечная палочка и термостойких колиформных бактерий была существенно лучше, чем в контрольной системе без дождевых червей. Кроме того, значения pH вермифilterованных вод на выходе из системы был близок к нейтральным значениям. Авторы считают, что технология вермифiltrации может быть применена в качестве альтернативной дешевой технологии для очистки грязных сточных вод в жарком климате для городской бедноты. Однако необходимы дальнейшие исследования по повышению эффективности и продолжительности работы вермифilterационных установок в таких экстремальных условиях

окружающей среды.

Теланг (Telang, 2015) изучал возможность очистки сточных вод молочной промышленности, которые содержат в себе очень высокое содержание органических веществ и общих взвешенных веществ. Результаты показали, что при использовании вермифилтра была достигнута хорошая производительность, а результаты были лучше, чем при использовании традиционных методов фильтрации сточных вод. Вермифильтрация оказалась экономически эффективной, так как затраты на очистку сточных вод снижались на 60-70%. Показатели по БПК₅, ХПК, общих растворённых веществ, ОВВ и жиров были снижены на 97,95%, 91,64%, 84,27%, 76,39%, 84,13%, соответственно. Автор считает, что вермифильтрованная вода является наиболее подходящей для ирригации в парках и садах, но потребуется дальнейшая очистка для использования в других целях.

Саху с сотрудниками (Sahu et al., 2015) использовали пилотную установку для очистки сточных вод от молочной и целлюлозно-бумажной промышленности и сточной воды от столовой на кампусе колледжа. Показано экспериментальными данными, что вермифильтрация является эффективным процессом для очистки сточных вод. Снижение показателей БПК₅, ХПК, содержания ОВВ достигается до 90%. При этом имеется возможность очищать сточные воды с широким диапазоном значений pH от 4,0 до 9,0 без нейтрализации. Сам процесс является экономически выгодным и экологически безопасным. Авторы считают, что многие промышленные предприятия могут рециклировать свои сточные воды на месте их образования.

Ануша с сотрудниками (Anusha et al., 2015) использовали вермифильтрацию для очистки муниципальных бытовых сточных вод с использованием дождевых червей вида *Eudrilus eugeniae*. Было показано, что в сточных бытовых водах, в которых содержалось 195 мг/л хлоридов, а показатель ХПК составлял 240 мг/л, после процесса вермифильтрации содержание хлоридов снижалось на 70-77%, показатель ХПК - на 57-66% при

времени удержания от 2 до 6 часов.

Дас с сотрудниками (Das et al., 2015) исследовали возможность очистки сточных вод аюрведических фармацевтических предприятий Индии, производящих препараты на основе трав. С этой целью сточные воды предварительно обрабатывали препаратами ферментов, расщепляющих белки и жиры (протеазой и липазой из *Bacillus sp.*), в течение 24-78 часов при температуре 37° С для снижения показателей БПК и ХПК, а затем подвергали вермифiltrации. Показано, что из таких сточных вод полученная вермифiltrованная вода имела существенное снижение показателей по БПК₅ на 98, 43%, ХПК – на 98, 03%, общее содержание растворённых веществ уменьшалось на 95,8%, ОВВ – на 78,66%, а жира – на 92,58%.

Натараджан и Каннадасан (Natarajan, Kannadasan, 2015) использовали технологию вермифiltrации для очистки сточных вод ликёро-водочного завода с дождевыми червями вида *Eudrilus eugeniae*. Так как сточные воды имели кислые значение pH 4,5, то их предварительно разбавляли водой и нейтрализовали до pH 5,5. Показано, что показатели БПК₅, ХПК, ОВВ и общих растворённых веществ после вермифiltrации уменьшились на 90%, 94%, 88% и 82%, соответственно. Авторы считают, что необходимо оптимизировать процессы вермифiltrации для данного типа сточных вод и масштабировать для очистки больших объёмов сточных вод ликёро-водочных заводов.

Мудзивапаси с сотрудниками (Mudziwapasi et al., 2016) оценивали в лабораторных условиях обезвреживание сточных вод с использованием пилотного биореактора и вермикультуры дождевых червей вида *Eisenia fetida* при гидравлической скорости нагрузки 0,193 м³/м²/ч и гидравлическом времени удерживания 0,481 ч. Было показано, что вермифiltrация приводила к значительному снижению уровню токсичности с использованием анализа на острую токсичность LC₅₀ на дафниях *Daphnia pulex*. Средняя эффективность удаления БПК₅ и ОВВ составляла

90,6% и 98,4%, соответственно.

1.5. Примеры практического использования крупномасштабных систем вермифильтрации для очистки сточных вод

Многие развивающиеся страны не могут позволить себе создать и обслуживать дорогостоящие станции по очистке сточных вод. Даже в городах развитых стран и, особенно, в пригородах технология вермифильтрации позволит перерабатывать собственные бытовые сточные воды на месте их образования, то есть децентрализованно, что может существенно снизить нагрузку на муниципальные станции по очистке сточных вод.

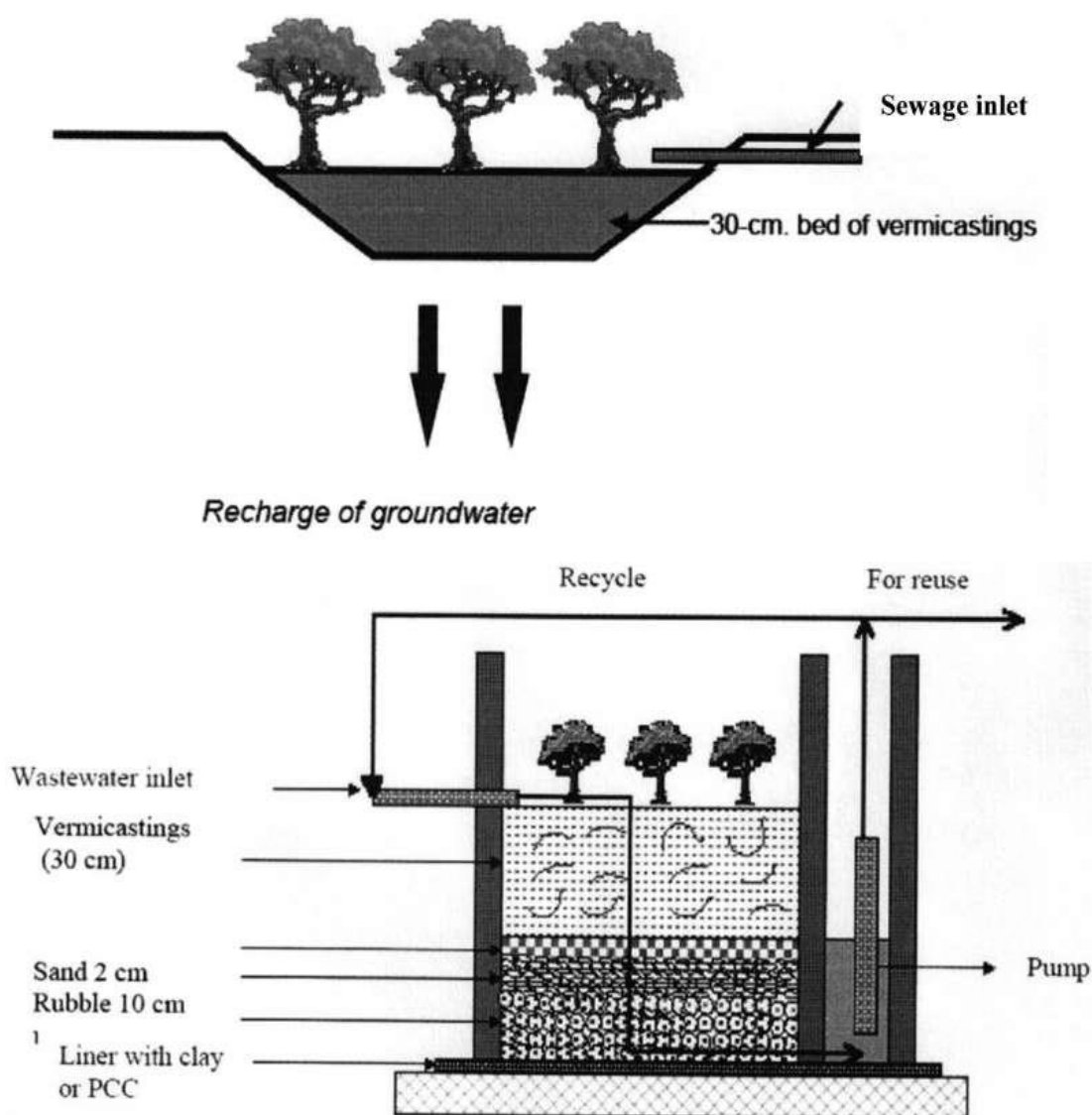
В связи с этим коммерциализация этой инновационной технологии и ввод в действие систем вермифильтрации для очистки бытовых, животноводческих и промышленных сточных вод приобретает актуальный характер. Вышеприведенные экспериментальные научные исследования были проведены во многих странах мира, чтобы научно доказать роль компостных червей в очистке сточных вод: муниципальных и некоторых видов промышленных сточных вод (особенно пищевой промышленности). Следует ожидать, что коммерциализация этой новой биотехнологии будет с каждым годом расширяться, потому что она имеет ряд некоторых экономических и экологических преимуществ перед традиционными способами очистки сточных вод.

Ниже приводим некоторые успешные проекты, осуществлённые в различных странах мира.

Одна из самых ранних систем вермифильтрации, которая была разработана и использовалась для очистки сточных вод с целью пополнения запасов подземных грунтовых вод (рис. 8a) или восстановления очищенной воды (рис. 8b), была разработана в Индии и описана Бхавалкар (Bhawalkar,

1995). В случае конструкции для регенерации воды, как показано на рисунке 8b, сточные воды могут быть обработаны за один или несколько этапов на основании данных по концентрации сточных вод (Bhawalkar, 1995).

Фильтр Biolytix™ считается первой широко используемой коммерческой системой вермифильтрации в Австралии, он состоит из аэробного фильтрующего слоя с компостными червями, которые преобразуют сточные воды в гумус (рис. 9). Нижний слой представляет собой слой геоплёнки с диаметром пор 80 мкм для удаления мелких частиц и обработанная вода используется для орошения (Biolytix, 2003).



**Рис. 8 – а) Система вермифильтрации для подзарядки подземных вод;
б) система вермифильтрации регенерации воды для повторного
использования (Bhawalkar, 1995).**

Cross Section
of a typical
Biolytix® Filter (BF6)

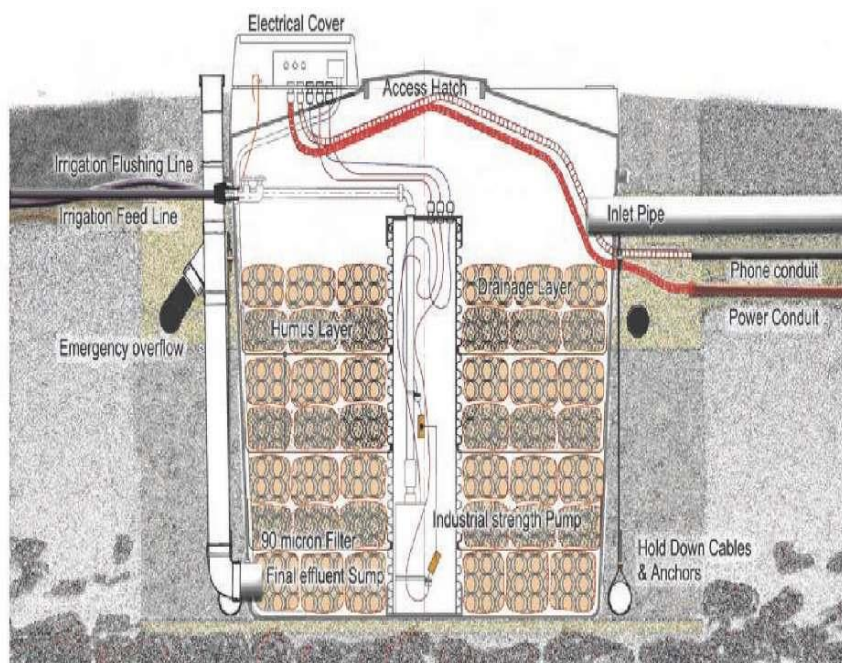


Рис. 9 – Схема коммерческой установки очистки сточных вод Biolytix™.

Гхатнекар с сотрудниками (Ghatnekar et al., 2010) применили в Индии трехступенчатую технологию вермикомпостирования в сочетании с системой капельного биофильтра, в котором присутствовала популяция дождевых червей вида *Lumbricus rubellus* для очистки сточных вод, образующихся при производстве желатина (рис. 10). Каждая из трёх установок по вермифильтрации представляла из себя ёмкости размерами 9 м x 7 м x 1 м, заглублённые в земле. На дне укладывались последовательно слои крупного и мелкого щебня, затем слой из дробленого кирпича, над ним два слоя гравия и мелкого песка. Верхний слой содержал поддерживающий субстрат из смеси опилок, листьев и коровьего навоза, инокулированный ферментами (протеазы и целлюлазы), микроорганизмами и дождевыми червями вида *Lumbricus rubellus*. Время задержки стоков в вермифилт্রে составляло всего 4-5 минут. Очищенная вода, прошедшая через все слои вермифильтра, накапливается в боковом канале через отверстия в нижней части и удаляется с помощью погружного насоса. Показано, что в воде после вермифильтрации показатели БПК и ХПК были снижены на 89,2 и 90,1%, соответственно. Эта очищенная вода использовалась для выращивания сине-зелёной водоросли

спирулины, ирригации и повторного использования на предприятии в туалетах. Вермикомпост отбирался раз в три месяца из слоя вермифилтра (1/4 объёма слоя вермифилтра) и использовался в качестве органического удобрения для продажи.

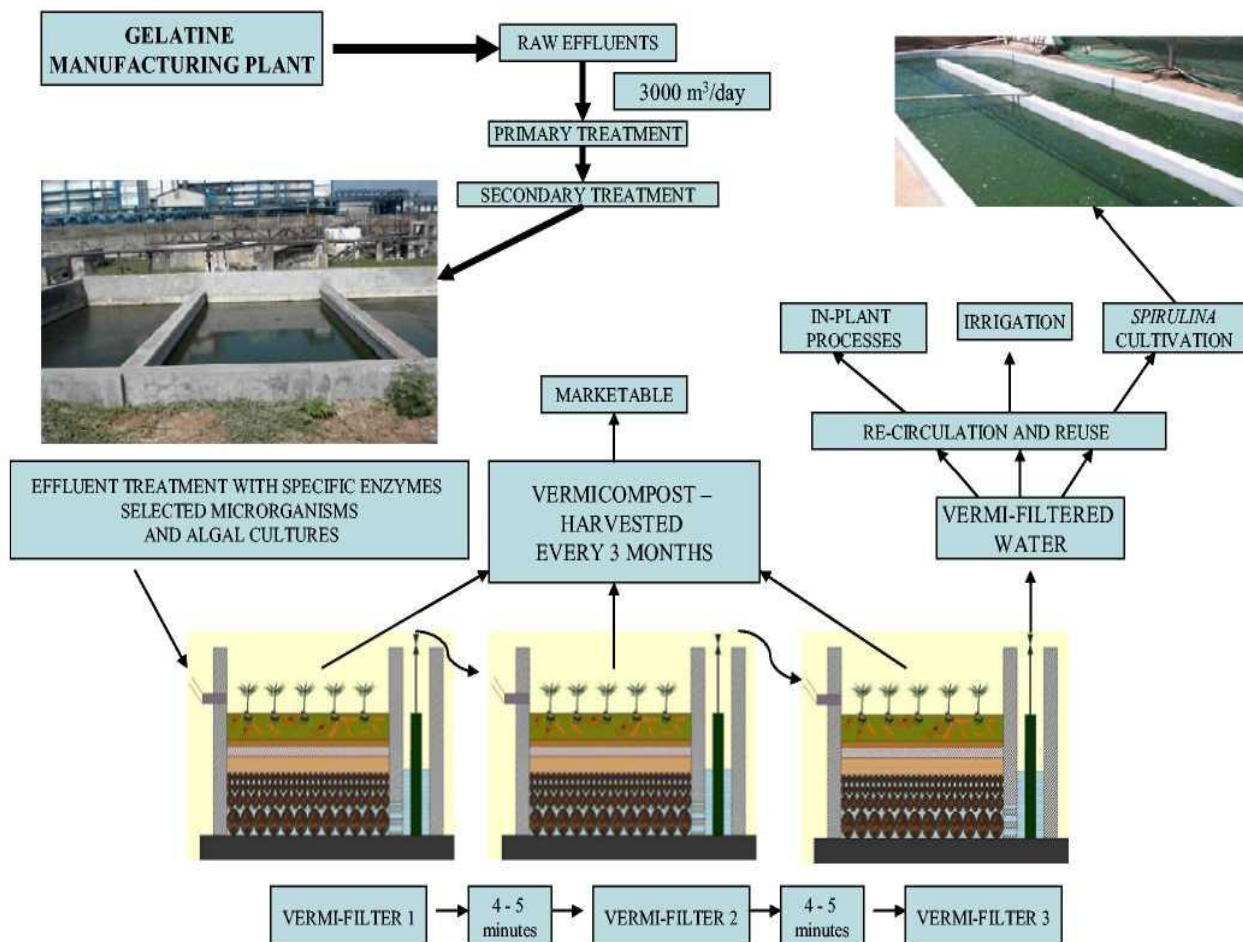


Рис. 10 – Система переработки сточных вод желатинового комбината с помощью трёх блоков вермифилтров (Ghatnekar et al., 2010).

Бхавалкар (Bhawalkar, 1996) считает, что в зависимости от степени загрязнения сточных вод и необходимого качества очищенной воды можно использовать одноступенчатую или многоступенчатую системы вермифилтра. В принципе одна установка по вермифилтрации может произвести воду любой степени очистки с помощью увеличения циклов обработки.

Маньючи с сотрудниками (Manyuchi et al., 2013) создали пилотную установку по вермифилтрации производительностью 1 000 м³/день и испытали её для очистки муниципальных сточных вод г. Хараре (Зимбабве).

Установка содержала в себе нижний 120-см слой гравия размером 7,0-8,0 см, над ним был следующий 100-см слой гравия размером 3,0-5,0 см, верхний 100-см слой состоял из мелкого гравия (8-12 мм) с песком. Вермифильтр представлял собой 100-см слой садовой земли, в который заселяли компостных червей вида *Eisenia fetida* при плотности 8 000 особей в м². Площадь вермифильтра равнялась 3,6м². Было показано, что при гидравлической нагрузке 0,93 м³/м²/сутки происходила удовлетворительная очистка сточных вод более, чем на 90% по БПК, ХПК и содержанию взвешенных частиц. Таким образом, подобные установки вермифильтрации способны производить крупномасштабную очистку муниципальных сточных вод для потенциального их повторного использования при ирригации.

Патрисио Сото (Soto, 2009) запатентовал во Франции способ обработки загрязненных органическими веществами бытовых и агропромышленных сточных вод с помощью технологии вермифильтрации, которая во Франции именуется как ломбрифильтрация.

Новый способ очистки сточных вод был исследован и разработан во Франции в лаборатории почвенной зооэкологии Национального института агрономических исследований (INRA, Монпелье) в партнерстве с университетом Монпелье как проект Resyclaqua (Рециклирование воды), в котором целью было продемонстрировать этот метод очистки сточных вод в промышленных масштабах для сообщества в 2000 жителей.

Вермифильтр состоит из 10 см слоя активного органического слоя субстрата (смесь древесной щепы, коры и сосновых опилок), в котором обитают компостные черви, размещенного над субстратом в 1 м, который сам находится над слоем гравия (рис. 11). Сточные воды пропускаются через сито для удаления твёрдой фракции и распыливаются на поверхность вермифильтра, через который они фильтруются.

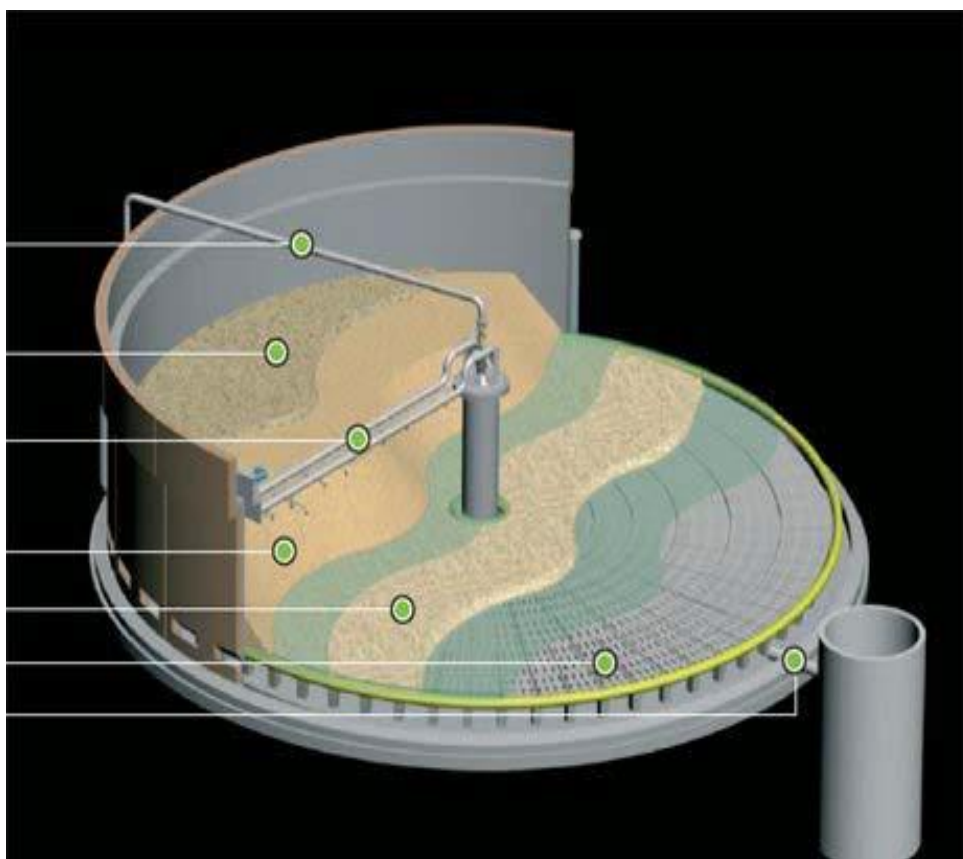


Рис. 11 – Схематическое изображение установки по вермифiltrации сточных вод.

Сточные воды очищаются в активном слое, состоящем из исходной смеси на 1/3 сосновой коры (размером от 25 до 40 мм) и 2/3 необработанных сосновых опилок, высотой в 100 см. Опилки содержат примерно 10% сосновые стружки (максимальная толщина 0,5 мм). Компостных червей вида *Eisenia andrei* заселяют в верхний слой вместе с 10-см слоем вермикомпоста (смесь светлого торфа и сосновой коры, вермикомпостированной в течение, по крайней мере, шести месяцев).

Сточные воды после прохождения через сито, регулярно разбрызгивают над круговым вермифильтром (который в случае системы Combaillaux имеет диаметр в 12 м) с помощью вращающегося дождевателя, оснащенного соплами (рис. 12).

Разбрызгивание сточных вод мелкими каплями гарантирует, что жидкость равномерно распределяется по всей поверхности вермифильтра до просачивания в активный слой. Наконец, вермифильтрированные сточные воды

дренируются в 10-см слой гравия из диоксида кремния диаметром 20-30, размещенного на дощатом настиле.



Рис. 12 – Вид изнутри установки по вермифильтрации для очистки муниципальных сточных вод.

Предлагаемая обработка сточных вод отличается от других экстенсивных систем следующими качествами:

а) отсутствие стадии обезжиривания, так как жиры перерабатываются в слое вермифилтра;

б) анаэробный реактор не используется до фильтрации и поэтому нет анаэробного ила;

в) отстойник или осветлитель требуется после вермифильтрации, поскольку все органические загрязнения удаляются в процессе вермифильтрации. Вермифильтрация, следовательно, не просто процесс фильтрации, она также работает как твёрдофазный ферментёр, устраняющий проблемы с илом.

С экологической точки зрения основное преимущество этого способа заключается в образовании минимального количества осадков, которые почти полностью состоят из твёрдой фракции, удаленной во время

предварительной обработки на сите (<2мм) и трансформируемых на месте в вермикомпост.

На основе французского патента Сото (Soto, 2009) и выше описанных исследований французская компания LombriTek écoinnovation (Экоинновационная вермитехнология) разработала три типа вермистанций для очистки бытовых сточных вод (www.lombritek.com):

- система LombriAER® для переработки бытовых стоков от 200 до 500 жителей без вермифилтра;

- система LombriAPL® для переработки бытовых стоков от 500 до 1000 жителей с использованием вермифилтра;

- система LombriSTEP® для переработки бытовых стоков от 1000 до 4000 жителей представляет собой комплексную любристанцию с использованием двух биологических процессов: вермифилтрации жидких стоков и вермикомпостирования твёрдой фракции органики (рис. 13).

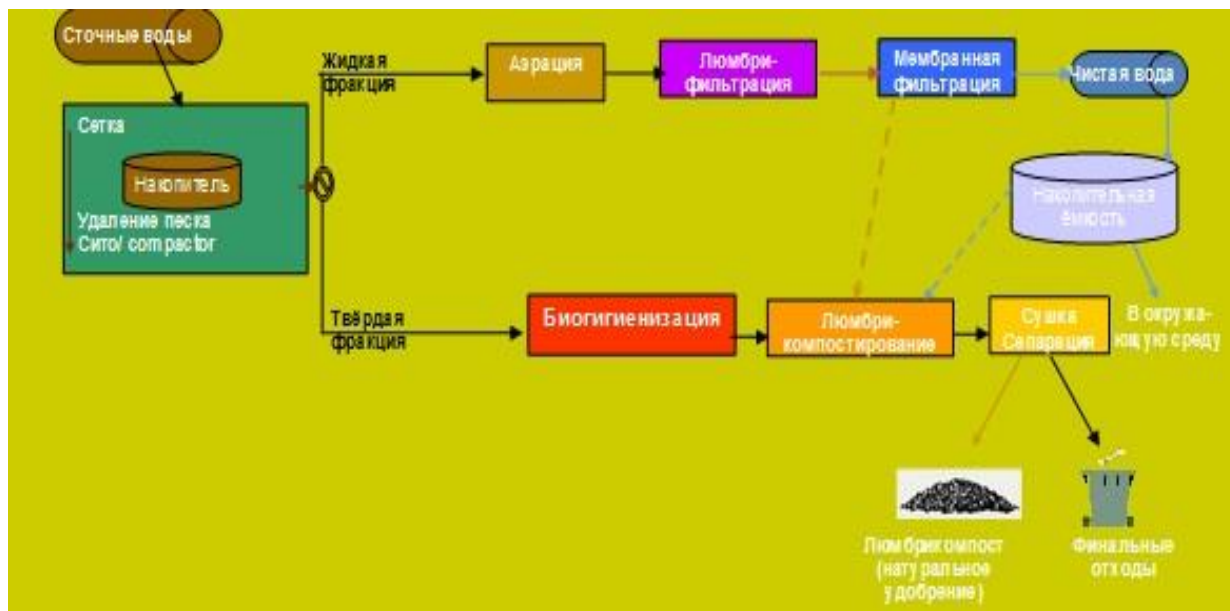


Рис. 13 – Комплексная переработка бытовых сточных вод с помощью вермифилтрации и вермикомпостирования на любристанции.

Вермифилтрующая установка размещается в небольшом компактном здании и может функционировать в любых климатических условиях.

Установка для очистки стоков от поселка, имеющего численность 2 000

жителей, с помощью вермифильтрации представляет собой ёмкость диаметром 12 м, высотой 2 м. Рабочий слой вермифилтра состоит из двух составляющих: 90-см слоя древесной стружки и коры (основа биофилтра) и 10-см слоя почвы с вермикультурой, над которым разбрызгиваются сточные воды, прошедшие предварительную обработку на сетчатом сите. В качестве вермикультуры используется смесь двух видов компостных червей: *Eisenia fetida* и *Eisenia andrei*. Такая люмбристанция имеет ряд преимуществ:

- низкие затраты на техническое обслуживание;
- аэробный процесс без образования осадков и без запаха;
- компактность системы;
- чистая вода подходит для ирригации;
- твёрдые отходы рециклируются в органические удобрения;
- подходит для любого климата, вермифилтр и компостирование производится в помещении под крышей.

Но данная система не предназначена для переработки некоторых видов промышленных отходов, она должна функционировать постоянно без сезонных перерывов и необходимо обучение операторов.

Недавно Сото с сотрудниками (Duclos et al., 2013) получил европейский патент EP2617685 A1 на способ ломбрифильтрации, т.е. вермифильтрации и на устройство для дезинфекции сточных вод. Устройство содержит вермифилтр, блок для предварительной обработки сточных вод и блок окончательной очистки воды. Вермифилтр состоит из нескольких фильтрующих слоёв, в одном из которых содержится лигноцеллюлозолитик, а также вермифильтрующий слой и слой биофильтрации и вентиляции. Такая система вермифильтрации рекомендуется для очистки бытовых сточных вод как отдельных жилых домов, так и небольших поселений.

Компания TRANSCHEM Agritech Ltd. (Индия) установила в 2011 году крупномасштабную установку по вермифильтрации в полумиллионном городе Бхавнагар (штат Гуджарат) для обработки 250 000 л сточных вод ежедневно (рис. 14). Она занимает площадь в 400 м². Слой вермифилтра в

составе биофильтра содержит слои гальки различного размера, покрытые слоями почвы, древесных опилок, вермикомпостом, в котором обитает популяция компостных червей. Сточные воды собираются предварительно в накопительный резервуар и разбрызгиваются над слоем вермифильтра. В данном случае аэрирование или предварительной обработки сточных вод не требуется. Очищенная вода собирается в другой резервуар и используется фермерами. В среднем показатели по БПК уменьшаются более чем 95%, ХПК более чем 85%, содержание взвешенных веществ снижается более чем 95 %, а фекальные коли-формы удаляются более чем 99% (Sinha и Valani, 2012). Содержание растворённого кислорода после вермифильтрации достигало значений 4-5 ppm.



Рис. 14 – Установка по вермифильтрации сточных вод производительностью в 200 тонн в сутки (Sinha, 2012).

1.6. Значение и преимущества технологии вермифильтрации перед традиционными системами очистки сточных вод

Биотехнология вермифильтрации является относительно новой недорогой и устойчивой технологией очистки муниципальных и некоторых промышленных сточных вод. Сотни установок по вермифильтрации различного масштаба в настоящее время успешно работают в Чили, Мексике, Венесуэле, Австралии, Индии и некоторых других странах (Sinha et al., 2013).

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики трёх аэробных технологий очистки сточных вод, которые были любезно предоставлены профессором Радживом К. Синха. Из данных этой таблицы ясно видно, что технология вермифильтрации превосходит по всем показателям хорошо известные традиционные аэробные технологии очистки сточных вод.

Система вермифильтрации имеет явные преимущества перед всеми традиционными системами очистки сточных вод: аэрируемые лагуны, аэробные процессы с использованием активного ила в аэротенках, капельные и дисковые биофильтры, которые являются высоко энергетически затратными и дорогостоящими.

Преимуществами технологии вермифильтрации являются:

- низкая стоимость операций и обслуживания;
- требуется мало энергии;
- не образуются осадки сточных вод;
- не используются химикаты;
- образуются хозяйственно ценные побочные продукты утилизации сточных вод (высокогумусированное органическое удобрение вермикомпост и биомасса компостных червей);
- очищенная вода обогащена питательными веществами (азотом, фосфором и калием) и микроэлементами и может использоваться для ирригации фермерских земель;
- процесс очень гигиеничен при полном отсутствии каких-либо запахов и без эмиссии парниковых газов.

Таблица 2.

**Сравнение некоторых систем биологической очистки сточных вод
(Soto, 2010).**

Параметры	Аэрируемые лагуны	Аэротенки с использованием активного ила	Вермифiltrация
Требуемая площадь Земли	5 м ² /чел	0.7 м ² /чел	0.25 м ² /чел
Время задержки	20 дней	6-8 час	30-45 мин
Необходимость в оборудовании	Простое (насосы, аэраторы и т.д.)	Сложное (насосы, аэротенки, переработка ОСВ и активного ила)	Очень простое (насосы и распылители)
Инвестиции (без земли)	60-100 \$/чел	150-300 \$/чел	35-60 \$/чел
Стоимость обслуживания	0.06 US \$/м ³ обработанных сточных вод	0.12 US \$/м ³ обработанных сточных вод	0.05 US \$/м ³ обработанных сточных вод
Затраты энергетические и эмиссия парниковых газов	Высокие	Очень высокие	Очень низкие
Рециклинг отходов и получение полезных продуктов	Нет	Нет	1) Чистая вода 2) Органическое удобрение 3) Биомасса дождевых червей
Эффективность снижения показателя по БПК	80 %	> 90 %	> 95 %

Очень важно подчеркнуть еще и то, что система вермифiltrации может работать децентрализованно, то есть на месте образования сточных вод (частные дома, коттеджи, посёлки, отели, перерабатывающие предприятия и т. д.). Такие установки по вермифiltrации необходимо устанавливать непосредственно на станциях очистки сточных вод или на предприятиях на месте образования сточных вод.

1.7. Сезонные изменения и эффективность системы вермифльтрации

Успешная работа любой вермифильтрующей системы будет зависеть от климатических условий и, особенно, в летние или зимние сезоны, так как они влияют на выживание компостных червей. Это является важным фактором в тех регионах, где температура резко падает в течение зимних месяцев, а также в тех регионах, где она сильно повышается в летний период и может превышать 40°C.

Ли с сотрудниками (Li et al., 2009) изучали влияние сезона на очистку сточных вод в вермифильтрующей системе. Авторам приходилось корректировать показатели гидравлической нагрузки HLR, чтобы исключить температурные колебания в некоторой степени за счет увеличения скорости нагрузки в период летних месяцев и снижение её во время зимних месяцев. Было установлено, что эффективность переработки существенно не зависит от сезонных колебаний, за исключением самых холодных и жарких дней. Они сделали заключение, что в небольших по объёму системах вермифльтрации в зимний период может происходить гибель компостных червей, поскольку такие системы не в состоянии поддерживать необходимую температуру для жизнедеятельности компостных червей. Однако необходимо провести более детальные научные исследования, чтобы сделать более конкретные выводы.

1.8. Адсорбционная доочистка сточных вод

Очистка сточных вод носит, как правило, многостадийный характер и включает операции отстаивания, фильтрования, коагуляции, флотации, химической и (наконец, завершающей) сорбционной обработки с использованием активного угля, ионообменных смол, цеолитов и других поглотителей. Адсорбцию на активных углях используют для удаления из сточных вод особо токсичных органических загрязняющих и

трудноокисляемых веществ. Её реализуют в тех случаях, когда биохимическая очистка стоков либо невозможна, либо не даёт необходимого эффекта, что часто характерно для замкнутых водооборотных систем промышленных предприятий (Мухин, Клушин, 2012).

Из известных сорбентов наиболее эффективны – активные угли. Они изготавливаются из углеродсодержащих материалов: угля, антрацита, древесины, скорлупы кокосов, торфа и др. Они хорошо сорбируют фенолы, полициклические ароматические углеводороды, в том числе канцерогенные, большинство нефтепродуктов, хлор- и фосфорорганические пестициды и многие другие органические и неорганические загрязнения (Мухин и др., 2012; Мухин и др., 2014; Мухин и др., 2015).

Несомненно, что использование сорбции на активных углях как дополнительного и заключительного этапа очистки сточных вод должно существенно увеличить эффективность очистки сточных вод после процесса вермифiltrации (степень извлечения загрязняющих веществ). Обычно наиболее эффективна сорбционная очистка низкоконцентрированных по целевым компонентам стоков, когда требуемого качества очищаемой воды достигают применением минимального количества сорбента.

С учётом изложенного следует считать, что работы по созданию оборотных водных циклов и замкнутых систем водоснабжения и канализации, базирующиеся на очистке и обезвреживании сточных вод с применением сорбции, наиболее предпочтительны и перспективны. Для процессов сорбционной очистки сточных вод могут быть использованы как зернёные, так и порошковые активные угли. В России применяют для таких процессов зернёные активные угли марок АГ-3, БАУ-А, КАД-йодный и порошковые марок ОУ-А, ОУ-В, УАФ, УАМ, КАД-молотый (Мухин, Клушин, 2012). Таким образом, активные угли в ансамбле с другими средствами предварительной физико-химической или биологической очистки могут эффективно решать весь спектр задач очистки сточных вод от токсичной органики и обеспечивать глобальную защиту гидросферы (Мухин, Клушин).

1.9. Стерилизация сточных вод после вермифiltrации с помощью электрохимически активированной воды Анолит АНК

Для получения безопасной дезинфицированной воды широко используются различные дезинфектанты химической природы. Но наивысшей антимикробной активностью среди всех известных жидких стерилизующих и дезинфицирующих средств при исключительно малой токсичности или при полном ее отсутствии для теплокровных организмов являются электро-химически активированные растворы, в частности, нейтральный Анолит АНК, который производится в установках типа СТЭЛ из разбавленного водного раствора хлорида натрия. Анолит АНК является раствором универсального назначения, поэтому используется как для дезинфекции и стерилизации. Анолит АНК, в отличие от 0,5-5,0%-ных растворов гипохлорита, которые обладают только дезинфицирующим действием, является стерилизующим раствором при концентрации оксидантов в диапазоне 0,005—0,05% (Сучков и др., 2004).

Действующими веществами в анолите АНК является смесь пероксидных соединений и хлоркислородных соединений. Подобная комбинация действующих веществ обеспечивает отсутствие адаптации микроорганизмов к биоцидному действию анолита АНК, а малая суммарная концентрация соединений активного кислорода и хлора гарантирует полную безопасность для человека и окружающей среды при его длительном применении. Анолит АНК является раствором универсального назначения, поэтому используется как для дезинфекции, предстерилизационной очистки и стерилизации, так и для общей уборки помещений, дезинфекции оборудования в ЛПУ, одежды, рук хирурга и т.д. Сумма соединений активного кислорода и хлора в анолите АНК (суммарное содержание оксидантов) находится в пределах от 100 до 500 мг/л, что в десятки раз меньше, чем в большинстве рабочих растворов современных дезинфицирующих препаратов. Анолит АНК не вызывает коагуляцию белка,

защищающего микроорганизмы и, благодаря разрыхленной структуре, легко проникает в микроканалы живой и неживой материи. Анолит АНК нетоксичен ввиду малой концентрации действующих веществ, поэтому не требует удаления с обработанных поверхностей после окончания обработки (Сучков и др., 2004).

1.10. Заключение

В последние годы быстро возрастает использование технологии вермифильтрации для очистки сточных вод, так как это даёт уникальные преимущества: более низкие эксплуатационные расходы на их техническое обслуживание. В данном обзоре литературы представлен анализ научно-исследовательских работ в разных странах мира по использованию этой новой технологии для удаления поллютантов из различных типов сточных вод. Тем не менее в долгосрочной перспективе эффективность очистки и устойчивость функционирования этой системы, по-прежнему, остается проблемой, так как эффективность обработки зависит от конструктивных параметров, эксплуатационных условий и факторов внешней среды.

Данная инновационная технология может быть рекомендована для практического применения. Скорее всего, это может произойти в ближайшее время в южных регионах России, а также в Султанате Омане, где дефицит воды является острой проблемой. Очищенные сточные воды с помощью технологии вермифильтрации необходимо будет испытать при поливе различных технических и продовольственных культур. Например, в Султанате Оман планируется использовать такие воды при выращивании саженцев финиковой пальмы и поливе финиковых пальм.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Отбор проб сточных вод

Отбор проб сточных вод проводился согласно рекомендациям «Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод. ПНД Ф 12.15.1-08» и «Инструкции по отбору проб для анализа сточных вод. НВН 33-5.3.01-85». Пробы сточных вод г. Владимира и сточных вод некоторых муниципальных предприятий использовались в экспериментах по вермифильтрации.

Пробы воды отбирали согласно рекомендациям «ГОСТ Р 51592-2000. Вода. Общие требования к отбору проб». В качестве пробоотборных сосудов использовали химически стойкие к исследуемым образцам сточных вод пластмассовые сосуды вместимостью по 5 л.

Для транспортирования и хранения проб сточных вод использовали 5-ти л емкости из полимерных материалов с навинчивающейся пробкой. Объем отбираемой пробы сточной воды - не менее 5,0 л. Отбор проб проводили в день выполнения экспериментов по вермифильтрации и анализов в лаборатории.

Физико-химические, агрохимические и микробиологические анализы образцов сточных вод до и после вермифильтрации исследовались в сертифицированной аналитической лаборатории воды МУП «ВладимирВодоканал» (г. Владимир).

Работа выполнялась на основании Договора о сотрудничестве между МУП «ВладимирВодоканал» и Владимирским государственным университетом в области совместной научно-образовательной деятельности.

2.2. Виды дождевых червей, используемых для вермифльтрации

Так как дождевые (компостные) черви играют критическую роль в процессе очистки сточных вод, то их численность и плотность популяции (биомасса) в почве, зрелость и здоровье являются важными факторами. В работе использовались дождевые (компостные) черви вида *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) промышленной линии «Московский русский гибрид», которые были любезно предоставлены компанией НПО ООО «БИОХИМПРЕСУРС» (г. Владимир). Этот вид компостных червей имеет широкий интервал температурной устойчивости и может обитать в органических отходах с широким диапазоном влажности.

Популяции дождевых червей, численностью в 5 000 взрослых особей, были помещены в ящики размером 60 x 50 x 20 см, содержащих в качестве поддерживающей среды садовую землю и в качестве кормового субстрата компостированный коровий навоз. Они предварительно выдерживались в течение двух недель для адаптации при комнатной температуре и влажности субстрата 70% относительной влажности.

2.3. Биохимическая потребность в кислороде (БПК₅)

Этот показатель характеризует содержание органики, которое может быть удалено методом биологической очистки, определяли йодометрическим и амперометрическим методами согласно с Природоохранными нормативными документами федеративными «ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения биохимической потребности в кислороде после 5 дней инкубации (БПК₅)» с дополнениями и изменениями от 30 мая 2001 г.

Массовую концентрацию растворенного в воде кислорода находят по формуле:

$$C_x = \frac{8,0 \times C_t \times V_t \times V \times 1000}{250 \times (V - V_1)},$$

где C_x - массовая концентрация растворенного кислорода в анализируемой пробе воды, мг/дм³;

C_t - концентрация раствора тиосульфата натрия, моль/дм³ эквивалента;

V_t - объем раствора тиосульфата натрия, пошедший на титрование, см³;

V - вместимость кислородной колбы, см³;

V_1 - суммарный объем растворов хлорида марганца и йодида калия, добавленных в колбу при фиксации растворенного кислорода, см³;

8,0 – масса миллиграмм-эквивалента кислорода, мг.

При анализе определяется количество кислорода, ушедшее в течение 5 суток без доступа света при 20°C на окисление загрязняющих веществ, содержащихся в единице объема воды. Непосредственно вычисляется разница между концентрациями растворённого кислорода в пробе воды после отбора и после инкубации.

2.4. Химическая потребность в кислороде (ХПК)

Этот показатель характеризует общее количество кислорода, необходимое для окисления всего органического материала (биологически активного, инертного органического вещества) с образованием углекислого газа и воды, а также окисляемого неорганического вещества. Определение показателя ХПК очищенной и исходной проб сточной воды проводили в соответствии с Природоохранными нормативными документами федеративными ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003. Методика измерения бихроматной окисляемости (химического потребления кислорода) в пробах природной, питьевой и сточной вод фотометрическим методом с применением анализатора жидкости Флюорат 02-3М. Измерения показателей ХПК

основано на обработке пробы воды бихроматом калия и серной кислотой при температуре 150°C, в присутствии катализатора процесса химического окисления – сульфата серебра. Нагревание пробы и последующее измерение оптической плотности проводят в герметичных оптических виалах в специальном термореакторе «ТЕРМИОН». Для снижения мешающего влияния хлоридов в анализируемую пробу добавляют сульфат ртути (II). Измерение оптической плотности раствора в виалах проводят в диапазоне длин волн 340-380 нм или 580-620 нм, в зависимости от ожидаемых значений ХПК.

2.5. Взвешенные вещества

Этот показатель характеризует количество примесей, которое задерживается на бумажном фильтре при фильтровании пробы, определяли в очищенной и исходной пробах сточной воды в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.254-09. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций взвешенных веществ и прокаленных взвешенных веществ в питьевых, природных и сточных водах гравиметрическим методом.

2.6. Методика определения значения pH

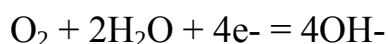
Предварительное определение значения pH с точностью до $\pm 0,1$ единицы в отобранных пробах определяли с помощью дигитального pH-метра компании Trans Instruments (Сингапур). Более точное значение pH проб сточных вод до и после вермифильтрации определяли с помощью лабораторного анализатора жидкости АНИОН 4102 (ООО НПП «ИнфраспекАналит», Новосибирск, Россия).

2.7. Методика измерения электропроводности

Измерение электропроводности проводили с использованием кондуктометра TDS-3 (Китай) по следующей методике. В химический стакан объемом 200 мл отбирали пробу водного раствора, в таком количестве, чтобы отверстия муфты были полностью погружены и опускали в стакан зонд. Для удаления захваченного воздуха внутрь муфты, слегка постукивали зондом по дну стакана. Затем, с помощью кнопок на устройстве выбирали диапазон измерения. Значение электропроводности отображалось на дисплее.

2.8. Методика определения содержания растворенного в воде кислорода

Измерение концентрации кислорода в воде проводили с использованием устройства - Анализатор Кислорода Промышленный Многофункциональный АКПМ-1-01 фирмы «Альфа БАССЕНС» (Москва, Россия). Анализатор работает на основе катодной поляризации - 600 мВ по отношению к вспомогательному электроду и измерении тока, который возникает в результате электрохимической реакции восстановления кислорода из исследуемой пробы по схеме:



Полученные при измерениях сигналы прямо пропорциональны массовой концентрации растворенного кислорода в исследуемой пробе. Сигналы датчиков оцифровываются и стандартизируются. После расчета и внесения коррекции на температурную зависимость коэффициента проницаемости кислорода через мембрану и температурную зависимость растворимости кислорода в воде, результат отображается на дисплее.

2.9. Коли-титр

Это наименьшее количество исследуемого материала в миллилитрах, в котором обнаруживается один живой микроорганизм кишечной палочки *Escherichia coli*. Этот показатель косвенно характеризует степень зараженности воды патогенными микроорганизмами (СанПиН 2.1.7.573–96).

2.10. Время гидравлического удерживания

Время гидравлического удерживания или время пребывания (HRT) представляет собой среднее время задержки сточных вод в системе очистки вермифильтрацией. Значение HRT системы вермифильтрации было рассчитано по уравнению (Sinha et al., 2008):

$$HRT = (\rho \times V_s) / Q_w$$

где:

HRT - время гидравлического удерживания (час);

V_s - объём вермифилтра (m^3);

ρ - порозность слоя вермифилтра;

Q_w - скорость потока сточных вод через слой вермифилтра ($m^3/час$).

2.11. Скорость гидравлической нагрузки

Скорость гидравлической загрузки (HLR) определяется как скорость, с которой сточные воды поступают в систему вермифильтрации, и выражается в m^3 потока на m^2 поверхности вермифилтра в час. Значения HLR зависят от нескольких факторов, таких как структура, объемная плотность, качество сточных вод, профиль аэрации и метода внесения эффлюента. В системе вермифильтрации значение HLR представляет собой объём сточных вод, который может быть обработан в достаточной степени в данный момент

времени. Скорость гидравлической загрузки системы вермифiltrации была рассчитана по формуле (Sinha et al., 2008):

$$HLR = V_w / (A \times t)$$

где:

HLR - гидравлическая нагрузка ($\text{м}^3/\text{м}^2/\text{час}$);

V_w - скорость потока сточных вод (м^3);

A - площадь вермифильтра (м^2);

t - время, необходимое для прохождения сточных вод через вермифильтр (час).

2.12. Характеристика материалов для вермифильтра

Для упаковки вермифiltrационной установки были использованы следующие материалы: дроблённый гранит различного размера, фракция крупного песка, древесные опилки и садовая земля. Для проведения характеристики компонентов вермифильтра использовались следующие методы:

а) Гранулометрический анализ и разделение по размеру используемых материалов производили с помощью наборов сит.

б) Определение насыпную и истинную плотность песка, щебня или гравия по ГОСТ 8735-88. Взвешивали стандартную лабораторную мерную емкость объемом 10 литров. В эту емкость с высоты 20 см насыпается сухой щебень доверху с горкой. Металлической линейкой или просто ровной дощечкой срезается лишнее вровень с краем емкости. Взвешивается мерная емкость со щебнем и вычитается вес пустой емкости. Среднюю плотность r_0 , $\text{г}/\text{см}^3$, вычисляют по формуле:

$$r_0 = (m - m_0) / V$$

где

m - масса образца, г;

V - объем образца, см^3 .

Среднюю плотность породы вычисляют как среднеарифметическое значение результатов определения средней плотности пяти образцов.

Таким образом, определяется показатель насыпная плотность щебня. Это важный и нужный показатель для расчетов. Затем определяется показатель истинной плотности щебня. В мерную 10,0 литровую лабораторную емкость со щебнем наливается вода из мерной, градуированной литровой стеклянной емкости по 1 л ровно до краев 10,0 емкости со щебнем. Последнюю партию воды наливаем очень осторожно, чтобы не было перелива и недолива. Высчитывается объем воды, который налили в 10,0 литровую емкость со щебнем. Этот объем налитой воды показывает объем межзерновых пустот в щебне. Именно налитая вода заполняет все межзерновые пустоты в щебне. По количеству налитой воды определяется коэффициент пустотности щебня. Для вычисления истинной плотности щебня необходимо вес щебня разделить на объем, который он занимает (это то же самое, что и удельный вес) в 1 литре. Для определения этих же показателей песка делается все то же самое и в той же последовательности, но используется 2-х литровая лабораторная мерная емкость и предварительно высушенный песок.

2.13. Активированные угли

Для дополнительной очистки проб сточных вод после процесса вермифльтрации были использованы активированные угли. Активированные угли марок ВСК-6×12 и ДАС, полученные соответственно из кокосовой скорлупы и антрацита, были любезно предоставлены доктором технических наук профессором В.М. Мухиным из лаборатории активированных углей «ЭНПО «НЕОРГАНИКА» (г. Электросталь, Московская область).

2.14. Анолит АНК

Для дезинфекции сточных вод после вермифiltrации был использован электрохимически активированный раствор - нейтральный Анолит АНК, который производится в установках типа СТЭЛ из сильно разбавленного водного раствора хлорида натрия. Анолит АНК в настоящее время используется для дезинфекции и стерилизации самых различных объектов. Анолит АНК, в отличие от 0,5-5,0%-ных растворов гипохлорита, которые обладают только дезинфицирующим действием, является стерилизующим раствором при концентрации оксидантов в диапазоне 0,005—0,05% (Сучков и др., 2004).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На городские очистные сооружения г. Владимира ежедневно поступает около 80 000 м³ сточных вод. Содержание органических загрязнений, находящихся в растворенном состоянии, оценивается в среднем значениями БПК₅ около 200 мг/л и ХПК около 400 мг/л, общих взвешенных веществ (ОВВ) содержится в среднем 100-200 мг/л при значениях pH среды 6,9-7,8.

3.1. Конструкция лабораторной установки для вермифльтрации сточных вод

3.1.1. Подготовка фильтрующих материалов и их характеристика

В качестве наполнителя и фильтрующего материала для зоны биофильтра был выбран дроблённый гранит, взятый у российской строительной компании «БалСтрой» (г. Владимир). Он был предварительно промыт проточной водопроводной водой. Высушен и разделен на фракции 20-25 мм и 6-10 мм с помощью сита. Древесные опилки с мелкой стружкой предварительно были отделены от древесной пыли с помощью сита с диаметром 2 мм, затем они были замочены в воде в течение суток и промыты проточной водопроводной водой.

Фракция гранита 6-10 мм имела пустой объём 0,51 и удельный вес 2,50 г/см³. Фракция гранита 10-25 мм имела пустой объём 0,43 и удельный вес 2,75 г/см³.

Первые лабораторные установки были изготовлены из 2-х коммерческих пластиковых баков ПВХ объёмом 45 л, имеющие следующие размеры: диаметр 38 см (верх) и 30 см (низ). В дно бака вмонтировались

краны для сбора фильтрованной воды. В качестве носителя микробной биоплёнки использовали дробленый гранит. На дно лабораторной установки укладывался слой в 10 см из гранита размером 20-25 мм, над ним слой в 10 см гранита размером 6-10 мм, затем слой в 10 см древесных опилок. Самый верхний слой в одной установке состоял из садовой земли без дождевых червей (контроль), а в другой установке верхний слой садовой земли заселяли дождевыми червями (вермифильтр). Площадь зоны вермифильтра составляла $0,11 \text{ м}^2$, а объём - $0,011 \text{ м}^3$, в который заселяли популяцию дождевых червей численностью 1000 взрослых особей (биомасса составляла 290 г), что соответствовало около $10\,000 \text{ червей/м}^2$. На рис. 15 показаны компоненты для упаковки лабораторной вермифильтрующей установки.

На рис. 14 представлены схемы лабораторной установки для фильтрации сточных вод.

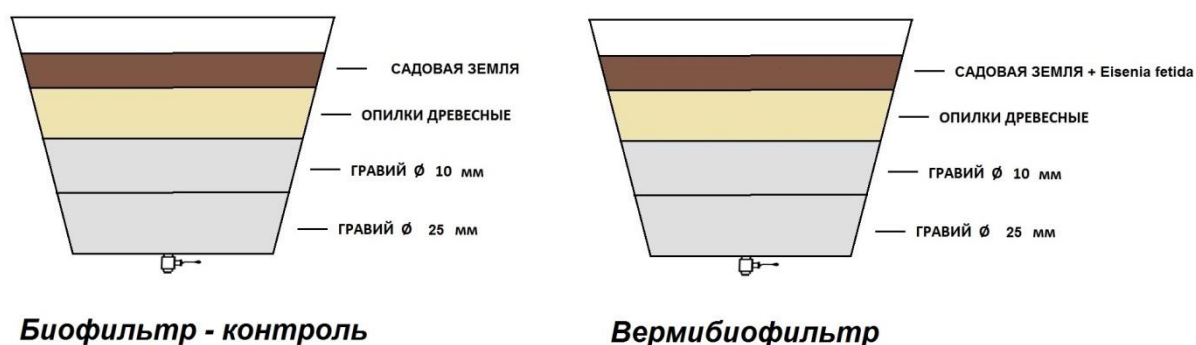


Рис. 14 – Схемы лабораторных установок для вермифильтрации сточных вод. Слева без дождевых червей, справа с дождевыми червями.



Рис. 15 – Компоненты для упаковки лабораторной вермифильтрующей установки:

- а) компостные черви *Eisenia fetida*;**
- б) садовая земля;**
- в) древесные опилки с мелкой стружкой;**
- г) фракция гранита 6-10 мм;**
- д) фракция гранита размером 10-25 мм.**

Установка для вермифильтрации имела общий рабочий объём 40 л, общий пустой объём установки составлял 22,4 л. Установку промывали перед экспериментами отстоянной в течение суток водопроводной водой в течение 3 дней.

Для подачи сточной воды использовались баки ёмкостью 30 л. Сточные воды поступали на верхний слой самой установки через перфорированные ПВХ-трубки. Скорость подачи сточных вод регулировалась с помощью кранов. На рис. 16 представлены лабораторные установки для вермифильтрации сточных вод.



Рис. 16 – Лабораторные установки для очистки сточных вод. Слева контрольная без дождевых червей, справа – вермибиофильтр.

3.1.2. Очистка сточных вод

Целью первых экспериментов было определить влияние дождевых червей в вермифилтре на очистку сточных вод. Для этого сточные воды пропускали через вермифилтр со скоростью $1 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{час}$. Результаты представлены в таблице 3.

Разработка конструкций лабораторных установок для вермифилтрации сточных вод. В качестве наполнителя и фильтрующего материала для зоны биофилтра был выбран дроблённый гранит строительной компании «БалСтрой» (г. Владимир), который был промыт проточной водопроводной водой, высушен и разделен на фракции 20-25 мм и 6-10 мм с помощью сита. Древесные опилки с мелкой стружкой предварительно были отделены от древесной пыли с помощью сита с диаметром 2 мм, замочены в течение суток и промыты проточной водопроводной водой.

Фракция гранита 6-10 мм имела пустой объём 0,51 и удельный вес $2,50 \text{ г/см}^3$. Фракция гранита 10-25 мм имела пустой объём 0,43 и удельный вес $2,75 \text{ г/см}^3$.

На первом этапе оценки эффективности вермифилтрации в процессе пропускания сточной воды через биофилтр мы использовали пластиковые баки объёмом 45 л, имеющие следующие размеры: диаметр 38 см (верх) и 30 см (низ). В дно бака вмонтировались краны для сбора фильтрата. В качестве носителя микробной биоплёнки использовали дробленый гранит, который укладывался в два слоя: первый толщиной 10 см размером 20-25 мм, второй - 10 см гранита размером 6-10 мм. На гранитный слой наносили древесные опилки толщиной 10 см.

В качестве субстрата для дождевых червей использовали слой «садовой земли». Площадь зоны вермифилтра составляла $0,11 \text{ м}^2$, а объём - $0,011 \text{ м}^3$. Величину популяции дождевых червей на один бак рассчитывали таким образом, чтобы их численность составила 10 000 взрослых особей/ м^2

(рис.17).

Первая установка для вермифильтрации имела общий рабочий объём 40 л, общий пустой объём - 22,4 л. Фильтры промывали перед экспериментами отстоянной в течение суток водопроводной водой в течение 3 дней.

Для подачи сточной воды использовались баки ёмкостью 30 л, из которых они поступали на слой вермифильтра капельно через перфорированные ПВХ-трубки. Скорость фильтрации определялась в зависимости от эффективности очистки сточных вод и физиологического состояния червей в зоне вермифильтра. Влажность в зоне вермифильтра не превышала 75-80%.

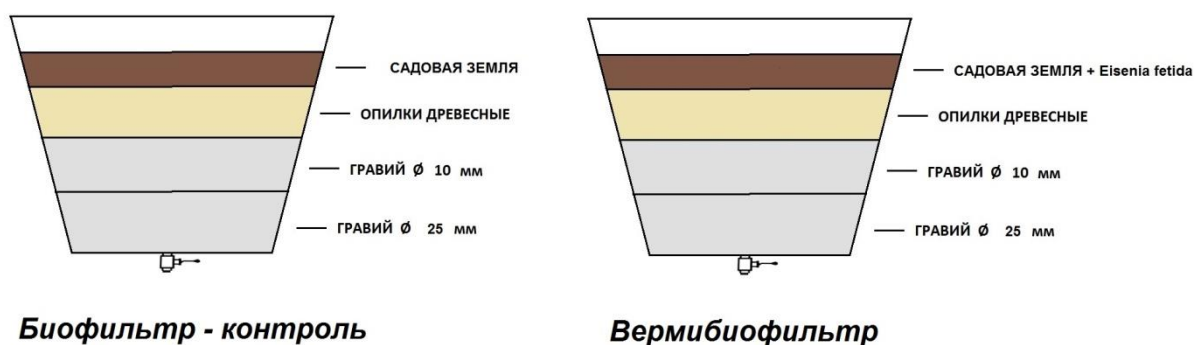


Рис. 17 – Схема первой лабораторной установки для вермифильтрации сточных вод.

На первом этапе исследований мы оценивали эффективность вермифильтрации технических сточных вод молокозавода в зависимости от содержания в них органических веществ. По результатам анализов исследований были сформированы две группы: в первой - величины БПК находились в диапазоне от 150 до 350 мг $O^2/дм^3$; во второй – от 800 до 1500 мг $O^2/дм^3$.

Таблица 3.

**Эффективность вермифiltrации промышленных сточных вод
молокозавода с низкой нагрузкой по содержанию органических веществ,
(БПК – в диапазоне от 150 до 350 мг O²/дм³)**

Показатели	Фильтрат контроль	Вермифильтрат опыт
Азот общий мг/дм ³	72±12	23±11 *
БПК ₅ , мг O ² /дм ³	213±30	107±17*
ХПК, мг O ² /дм ³	499±81	254±52*
Фосфор общий мг/дм ³	30±14	3±2*
ОВВ мг/дм ³	133±20	70±15*
рН	7,0	7,2

Примечания: * – статистически значимые отличия при $p < 0,05$; данные в таблице представлены средними арифметическими и их стандартными ошибками.

Результаты, представленные в таблице, позволяют заключить, что при оптимально подобранных параметрах скорости фильтрации и количества компостных червей, эффективность вермифiltrации оцениваемая по основным показателям составляет около 50% для БПК, ХПК, общего азота и ОВВ.

На показатели БПК и ХПК, удаление аммиака и общего азота влияют высота упаковочных слоёв в вермифильтре, определяющая уровень кислорода (Akhavan и др., 2013). Регулировка высоты слоя может влиять на величину популяции дождевых червей (Molina и др., 2013). Упаковка и высота слоёв фильтрующих материалов являются решающими факторами для удаления биогенных веществ при вермифiltrации (Zhao и др., 2009). Было показано, что изменение высоты вермифильтра оказывает существенное влияние на уровни удаления общего фосфора, на численность популяции дождевых червей и актиномицетов, (Wang и др., 2014).

На следующем этапе эксперимента мы оценивали возможность использования технологии вермифiltrации для сточных вод с высоким содержанием органических веществ, обладающих максимальной

удобрительной активностью. Результаты этого эксперимента представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Эффективность вермифiltrации промышленных сточных вод молокозавода с высокой нагрузкой по содержанию органических веществ (БПК – в диапазоне от 800 до 1500 мг $O^2/дм^3$)

Показатели	Фильтрат контроль	Вермифильтрат опыт
Азот общий мг/дм ³	146±21	65 ±23*
БПК ₅ , мг $O^2/дм^3$	1238±150	575±117*
ХПК, мг $O^2/дм^3$	2416±251	1351±150*
Фосфор общий мг/дм ³	50±15	25±13
ОВВ мг/дм ³	599±61	287±47*
рН	5,9 – 6,2	6,3 – 6,5

Примечания: * – статистически значимые отличия при $p < 0,05$.

Результаты эксперимента показывают, что технология вермифiltrации может успешно использоваться для сточных вод с очень высоким уровнем содержания органических веществ, когда показатель БПК находится в диапазоне величин от 1000 до 1500 мг $O^2/дм^3$.

Высокая эффективность процесса вермифiltrации выявленная на первом этапе эксперимента, определение оптимальных соотношений популяции червей и соотношения компонентов фильтра позволило перейти к решению основных задач:

1. Оценить эффективность вермифiltrации муниципальных сточных вод г. Владимира культурой *Eisenia fetida* в режиме стационарного многодневного мониторинга.

2. Изучить технические и экономические предпосылки для использования электрохимически активированной воды «Анолит АНК» для дезинфекции вермифильтрата.

3. Разработать проект технологии вермифiltrации муниципальных и хозяйственных сточных вод для Султаната Оман.

3.2. Конструкция лабораторной установки для длительной вермифльтрации сточных вод

С целью изучения динамики эффективности вермифльтрации в условиях многодневного эксперимента, достижения более эффективного процесса очистки сточных вод была создана установка где суммарная высота слоёв биофильтра составляла 45 см при соотношении высоты к диаметру 1,18. Для этого была использована пластиковая ПВХ канализационная труба диаметром 16 см. Она была распилена на отдельные части длиной по 105 см, в которые были вклеены заглушки с вмонтированными в них кранами.

Изменение высоты упакованных слоёв в вермифильтрующей установке может непосредственно повлиять на показатели ХПК, удаление аммиака $\text{NH}_3\text{-N}$ и общего азота, так как регулирование высоты упаковочных слоёв в вермифилтре приводит к различным аэробно-анаэробным процессам в микросреде (Akhanan и др., 2013). Кроме того, рост и размножение дождевых червей связаны с влажностью системы, вентиляцией фильтрующего материала и уровня метаболизма дождевых червей. Регулировка упаковки высоты слоя может влиять на ключевые факторы вермифльтрации. Высота слоёв фильтрующих материалов являются решающими факторами для удаления токсикантов (Zhao и др., 2009). Было показано, что изменение высоты вермифильтра оказывает существенное влияние на уровни БПК и ХПК, содержание общего фосфора, на численность популяции дождевых червей и численность актиномицетов. Высокая эффективность удаления поллютантов, активность дождевых червей и численность микроорганизмов достигались, когда суммарная высота слоёв фильтрующих материалов была не менее 60 см.

В качестве наполнителя вермифильтра был использован строительный щебень, который был отмыт водой, просушен на воздухе и фракционирован на ситах с разным диаметром ячеек. На дно такой установки помещался слой

щебня (25 см) размером частиц 20-25 мм, затем следующий слой (25 см) частиц размером 4-10 мм, затем слой (25 см) частиц менее 4 мм, затем слой опилок (15 см). В верхний слой садовой земли заселяли популяцию дождевых червей (150 взрослых особей).

Рабочая зона лабораторной установки составляла 100 см при диаметре 16 см. Соотношение высоты рабочей зоны установки к её диаметру составило 6,25. Общий объём установки составлял 19,0 л, пустой объём – 9,2 л. Схема установки представлена на рис. 18.

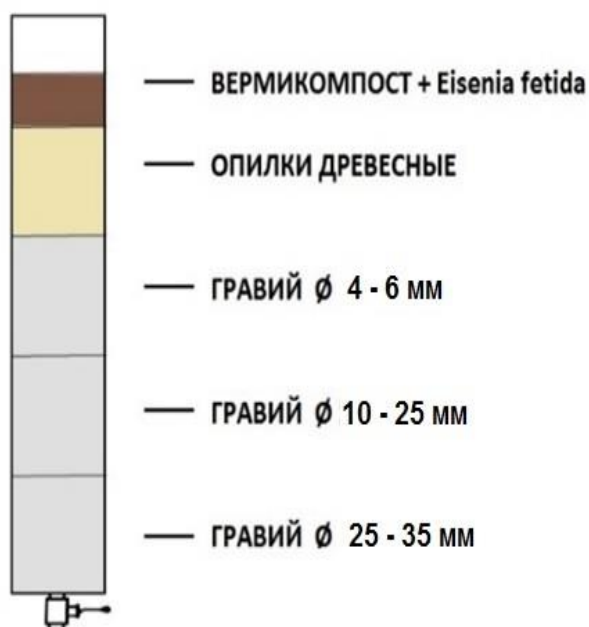


Рис. 18 – Схема лабораторной установки для вермифильтрации сточных вод в многодневном эксперименте.

Для того чтобы установка по вермифильтрации работала более эффективно, через нее пропускали сточные воды в течение одной-двух недель. Это способствовало обрастанию наполняющих материалов биоплёнкой из микроорганизмов. Скорость пропускания сточных вод в этом эксперименте регулировалась таким образом, что бы влажность вермифильтра не превышало 80%.

Сточные воды поступали на слой вермифилтра капельно через перфорированные ПВХ-трубки. Скорость фильтрации определялась в зависимости от эффективности очистки сточных вод и физиологического состояния червей в зоне вермифилтра.

Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Эффективность очистки муниципальных сточных в процессе многодневной вермифилтрации.

Показатели	Филтрат контроль	Вермифилтрат опыт
Азот общий мг/дм ³	146 ±12	65±11 *
БПК ₅ , мг O ² /дм ³	213±30	107±17*
ХПК, мг O ² /дм ³	499±81	254±52*
Фосфор общий мг/дм ³	19±6	16±5
ОВВ мг/дм ³	260±35	18±15*
pH	7,0-7,5	7,2-7.5
Цвет	серый	светло-коричневый
Запах	сильный неприятный	отсутствует
Фекальные колиформы (КОЕ/100 мл)	> 10 ⁶	10 ³

Примечания: * – статистически значимые отличия при p<0,05.

Результаты представленные в таблице 3 позволяют заключить, что при оптимально подобранных параметрах скорости фильтрации и количества компостных червей, эффективность вермифилтрации в колонках с сформированной микробиотой, оцениваемая по величинам ОВВ. БПК и ХПП составляет от 45 до 60%. Показатель КОЕ/100 снижается на 3 порядка.

В процессе вермифилтрации происходит экстракция водорастворимых веществ из зоны вермифилтра органической и неорганической природы, включая гуминовые вещества. Поэтому вермифилтрат имеет коричневый

цвет (рис. 19).



Рис.19 – Муниципальные сточные воды г. Владимира до (слева) и после прохождения вермифилтра (справа).

При изучении микробиологических процессов при обработке бытовых сточных вод с помощью вермифльтрации было показано, что необходимо в течение первых трёх недель пропускать сточные воды для акклиматизации дождевых червей в зоне вермифилтра и колонизации микроорганизмами фильтрующих материалов и обрастания их биоплёнкой.

В наших экспериментах в течение одной недели были достигнуты хорошие результаты очистки муниципальных сточных вод по основным показателям качества воды: ХПК, БПК₅ и ОВВ.

3.3. Определение фитотоксичности и ростовых свойств вермифилтрата

С целью контроля фитотоксичности вермифилтрата и оценки возможного его рост стимулирующего влияния был проведен тест на проращивание семян тритикале. Для этого 50 семян поместили на фильтровальную бумагу в чашки Петри диаметром 10 см и добавили 5 мл вермифилтрата. Контроль - вода.

Чашки закрывали и оставляли при комнатной температуре на 5 суток при температуре 25⁰С. По окончании оценили сырую биомассу проростков и их длину. Результаты опытов представлены в таблице 6 и на рис. 20.



Рис. 20 – Опыт по проращиванию семян тритикале. Слева семена замочены в вермифильтрате, справа – контроль.

Таблица 6.

Влияние вермифильтрата на скорость проращивания семян тритикале (n = 50).

Пробы	Сырая биомасса проростков, г	Средняя длина проростка, мм
Контроль	2,9±1,1	58,6±17,7
Вермифильтрат	3,8±1,8*	81,1±24,7*

Примечания: * – статистически значимые отличия при $p < 0,05$.

Считается, что снижение размера корней или проростков на 70% является признаком фитотоксичности, а увеличение этих параметров на 20% - признаком роста стимулирующих препаратов. Из результатов представленных в таблице 6 следует, что вермифильтрат сточных вод обладает рост стимулирующей активностью.

3.4. Использование электрохимически активированной воды Анолит АНК для удаления остаточной микрофлоры в вермифильтрате

Для уменьшения вредного воздействия на окружающую среду удаление патогенов из сточных вод следует придавать особое значение. Поэтому процессы дезинфекции имеют решающее значение для работы очистных сооружений. Дезинфекция традиционно осуществляется путем

хлорирования, что значительно снижает уровень патогенов, но могут представлять серьезную опасность для здоровья человека в результате образования побочных продуктов. Озон является очень мощным дезинфицирующим средством, которое может удалить широкий спектр микроорганизмов, но он представляет собой нестабильное соединение, которое разлагается очень быстро.

Облучение УФ-светом является наиболее эффективным методом для дезинфекции, однако затраты, связанные с этим способом, высоки, и поэтому потребность в недорогом и эффективном способе дезинфекции давно существует. Использование электро-активированной воды Анолит АНК является новым, безопасным и дешевым способом для дезинфекции сточных вод.

В вермифильтрат сточной воды добавляли электро-активированную воду анолит АНК в соотношениях: 99:1 и 95:5. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7.

Влияние электро-активированной воды «Анолит АНК» на титр фекальных колиформ

Пробы	Титры фекальных колиформ, КОЕ/100 мл
Сточная вода - контроль	$\geq 10^6$
Сточная вода после вермифильтрации	10^3
Сточная вода после вермифильтрации + Анолит 1%	10^2
Сточная вода после вермифильтрации + Анолит 5%	0

Из данных таблицы 7 следует, что «Анолит АНК» в диапазоне концентраций от 1 до 5% ингибирует рост кишечной палочки.

Использование электро-активированной воды Анолит АНК является новым, безопасным и дешевым способом для дезинфекции сточных вод. Технология дезинфекции вермифильтрата на основе использования электро-

активированной воды «Анолит АНК» может оказаться весьма востребованной.

3.5. Преимущества, недостатки и ограничения технологии очистки сточных вод с помощью вермифильтрации

Многими исследователями считается, что технология вермифильтрации способна предложить реально экономически эффективный и удобный способ очистки различных видов сточных вод - от бытовых до промышленных. С её помощью возможно обеспечить замкнутую систему очистки сточных вод, так как вермифильтрат, может быть повторно использован для ирригации, а другое вторичное использование полученного вермикомпоста - в качестве побочного агрономически ценного продукта и, следовательно, может быть звеном в органической цепочки рынка удобрений. Поэтому часть затрат на эту технологию может быть компенсирована за счет повторного использования вермифильтрованной воды и вермикомпоста. Технология вермифильтрации имеет потенциал для решения очистки сточных вод и водного кризиса одновременно и имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными процессами очистки сточных вод.

Вермикультура в составе вермифилтра при совместном взаимодействии с почвенными микроорганизмами, иммобилизованными на биофилтре, способна в результате механизмов поглощения и биodeградации удалять из сточных вод органические и неорганические загрязнители по таким важнейшим показателям качества воды как БПК₅ более, чем на 90%, ХПК — на 80-90%, растворённые вещества на 90-92% и ОВВ на 90-95%.

Технология вермифильтрация способна обеспечить устойчивый способ очистки различных типов сточных вод. Однако необходимо проведение более детальных исследований, чтобы повысить эффективность вермифильтрующих систем и сделать их надежной и эффективной коммерческой технологией.

Изучение потенциально вредных микроорганизмов до и после переработки сточных вод также желательно, так как большая часть сточных вод содержит вредные патогены, и имеется необходимость анализировать их, прежде чем обработанная вода может быть повторно использована.

Системы вермифильтрации зависят от живущих в них сообществ, то есть компостных червей и микробов, которые перерабатывают отходы. Такие факторы, как виды компостных червей и количество биомассы, климатические условия, состав сточных вод и скорость загрузки и время удерживания сточных вод, являются наиболее важными в отношении производительности системы. Результаты научных исследований показывают, что вермифильтрация может настоятельно рекомендоваться для сельских населенных пунктов, небольших общин и малых предприятий, производящих органические сточные воды в качестве жизнеспособной альтернативы традиционным способам очистки сточных вод при условии, что условия будут благоприятными для роста компостных червей.

Несмотря на то, что система вермибиофильтрации является низко стоимостным и экологически безопасным и выгодным способом очистки сточных вод, при более тщательном рассмотрении и анализе каждого аспекта этой системы становится очевидным то, что этот способ является не таким уж и простым. Включение вермикультуры в состав биофильтра приводит к усложнению обеспечения и поддержания оптимальных условий функционирования системы для самой высокой производительности и эффективности. Такие факторы, как температура, уровни влажности и содержание кислорода, гидравлическая нагрузка и время гидравлического задержания чрезвычайно важны для выживания популяции дождевых червей в системе, чтобы гарантировать достаточно высокое качество очищенных сточных вод. Тем не менее, имеются широкие возможности для более подробных научных исследований, чтобы усовершенствовать эту перспективную биотехнологию очистки сточных вод более эффективной.

Технология вермифильтрации может быть рентабельным,

эффективным, экономичным и удобным процессом без образования осадков сточных вод и без выделения неприятно пахнущих газов. Любые нетоксичные сточные воды от домашних хозяйств, коммерческих организаций или промышленных предприятий могут успешно перерабатываться с помощью дождевых червей, а сама технология может быть также отработана для переработки специфических видов сточных вод. Она может использоваться децентрализованно отдельными производствами для того, чтобы снизить нагрузку на очистные сооружения.

3.6. Автоматизированная система вермифльтрации для очистки сточных вод

Была поставлена задача разработать автоматизированную систему вермифльтрации по очистке сточных, которая бы обеспечивала минимальные затраты физического труда и времени при очистке сточных вод в зависимости от типа сточных вод, мощности и конструктивного исполнения установки; контролирования режимов гидравлического удерживания и гидравлической нагрузки в системе; контролирования самого процесса очистки сточных вод по основным её показателям; обеспечения максимальной простоты, надежности и безопасности; получения требуемой производительности установки с оптимальными параметрами процесса очистки сточных вод и достижения высокой экономичности и экологичности самой установки и обслуживаемого объекта.

Данная задача решается нами за счет того, что установка для очистки сточных вод с помощью технологии вермифльтрации дополняется блоком информационных технологий при использовании автогенераторных измерительных преобразователей и системы управления, осуществляющего сбор, хранение и анализ информации методами статистики с целью выявления корреляционных связей измеренных АИП в реальном масштабе времени.

В обзоре литературы описаны многие известные лабораторные, пилотные и промышленные установки различного типа и конструкций для очистки сточных вод с помощью вермифильтрации. Они все без исключения функционируют в режиме ручного управления. Это является основным недостатком, так как отсутствует возможность контролирования основных качественных параметров (t , pH , mS , O_2) очищаемых сточных вод в реальном масштабе времени, и, как следствие этого, отсутствие возможности управлять автоматически технологическим процессом очистки сточных вод в зависимости от качественных, количественных и режимных параметров технологического процесса. Для выполнения подобных измерений необходимо вручную отбирать пробы и делать их анализ в лабораторных условиях в течение продолжительного времени.

Для эффективной и стабильной работы системы для вермифильтрации сточных вод требуется определенное время. Так, Арора и сотрудники (Arora et al., 2016), изучая микробиологические процессы происходящие при обработке хозяйственно-бытовых сточных вод с помощью вермифильтрации в течение 91 дней, показали на то, что, прежде всего, требовалось в течение первых трёх недель ежедневно в течение 3-х часов пропускать сточные воды для акклиматизации дождевых червей в зоне вермифилтра и колонизации микроорганизмами фильтрующих материалов и обрастания их биоплёнкой. После этого периода акклиматизации установка для вермифильтрации начинала ежедневно работать в течение 6 часов в день при комнатной температуре. Они показали, что показатели ХПК, БПК₅, содержание ОВВ, аммония и общего фосфора в вермифильтрованной сточной воде начинали существенно снижаться только через 28, 42, 21, 14 и 7 дней, соответственно.

Поэтому нами поставлена задача разработать автоматизированную систему по очистке сточных вод с помощью вермифильтрации, которая позволяла определять степень готовности установки для вермифильтрации,

обеспечивала минимальные затраты физического труда и времени оператором системы управления процессом вермифильтрации при очистке сточных вод в зависимости от типа сточных вод, мощности и конструктивного исполнения установки; контролирования режимов гидравлического удерживания и гидравлической нагрузки в системе; контролирования самого процесса очистки сточных вод по основным её показателям; обеспечения максимальной простоты, надежности и безопасности; получения требуемой производительности установки с оптимальными параметрами процесса очистки сточных вод и достижения высокой экономичности и экологичности самой установки и обслуживаемого объекта.

Данная задача решается за счет того, что установка для очистки сточных вод с помощью технологии вермифильтрации дополняется блоком информационных технологий при использовании автогенераторных измерительных преобразователей и системы управления, осуществляющего сбор, хранение и анализ информации методами статистики с целью выявления корреляционных связей, измеренных АИП в реальном масштабе времени.

Пилотная установка для очистки сточных вод с помощью технологии вермифильтрации представляет собой пластиковую ёмкость, в которую помещают на проволочной сетке слои измельченного щебня разного размера, а на самый верх на сетке слой садовой почвы, в который заселяют популяцию компостных червей (собственно вермифильтр). Пилотная установка снабжается датчиками температуры, pH-метрии, электропроводности и концентрации растворённого кислорода (t , pH, mS, O_2), которые в свою очередь включаются в автоматизированную систему для измерения основных показателей очищаемых сточных вод в реальном масштабе времени, которые поступают в информационную систему, где вычислительно-логический блок формирует управляющие сигналы для систем регулировки качества параметров процесса очистки. На рисунке 21

представлена блок-схема установки для очистки сточных вод вермифильтрацией с автоматизированной системой управления.



Рис. 21 – Схема пилотной установки для очистки сточных вод вермифильтрацией с автоматизированной системой управления.

Автоматизированная система управления состоит из трех блоков: блок управления, аналитический блок, база данных (рис. 22). На вход автоматизированной системы поступают данные о начальном физическом состоянии системы (объем нефильтрованных сточных вод, время подачи сточных вод в систему очистки) и заносятся в аналитический блок.

В реальном времени со всех датчиков (комбинированных pH-метров), расположенных на разных уровнях вермифилтра, снимаются показания о текущей температуре, кислотности, электропроводности и концентрации растворённого кислорода (t , pH , mS , O_2), которые поступают в блок управления. На основе текущих показаний, в случае отклонения от допустимых параметров, подается управляющее воздействие на установку для регулирования качественных параметров процесса очистки, во избежание гибели слоя вермифилтра.

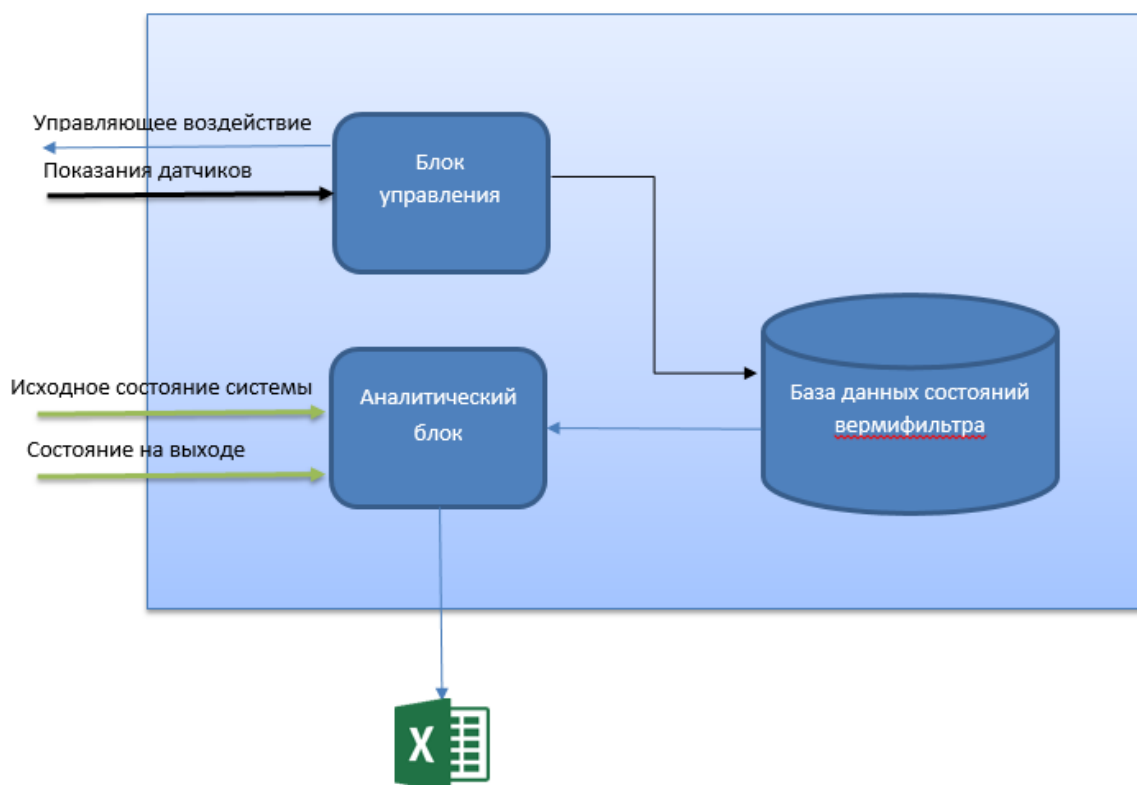


Рис. 22 – Схема компонентов автоматизированной системы управления.

Параллельно показания всех датчиков заносятся в базу данных и по мере прохождения циклов вермифилтрации происходит накопление статистической информации о состоянии вермифилтра.

По завершению работы пилотной установки для вермифилтрации в аналитический блок заносятся данные о конечном физическом состоянии системы (объем отфильтрованных сточных вод, время завершения цикла вермифилтрации). Из аналитического блока системы выгружается сводная информация о цикле вермифилтрации в табличный документ для последующего анализа и выявления корреляционных связей между параметрами установки.

Эта автоматизированная модель пилотной установки для вермифилтрации сточных вод относится к области биотехнологии, в частности к биологической очистке сточных вод и может быть использована для обеспечения оптимального управления пилотными и промышленными установками вермифилтрации для очистки сточных вод в коммунальном

хозяйстве городов, поселков и различных отраслях промышленности и сельского хозяйства для очистки хозяйственных и промышленных сточных вод, содержащих биологически разлагаемые вещества. На описанную систему автоматизированной пилотной установки для очистки сточных вод с помощью вермифильтрации подана патентная заявка на полезную модель (Титов И. Н., Салех Х.М., Лысова Е.К., Фарзах Фаваз Салим Фатах. Автоматизированная система вермифильтрации для очистки сточных вод. Патентная заявка на полезную модель РФ № 030416 от 19.05.2016.).

Для реализации автоматизированной системы управления для очистки сточных вод с помощью вермифильтрации используются беспроводные датчики, которые непрерывно передают значение датчиков (РН, температура) на мобильные устройства, которые в свою очередь передают удаленному серверу через интернет для обеспечения мониторинга состояний автоматизированной системы очистки сточных вод.

На рисунке 23 представлена блок-схема системы удаленного мониторинга состояний автоматизированной системы очистки сточных вод с помощью беспроводных датчиков.

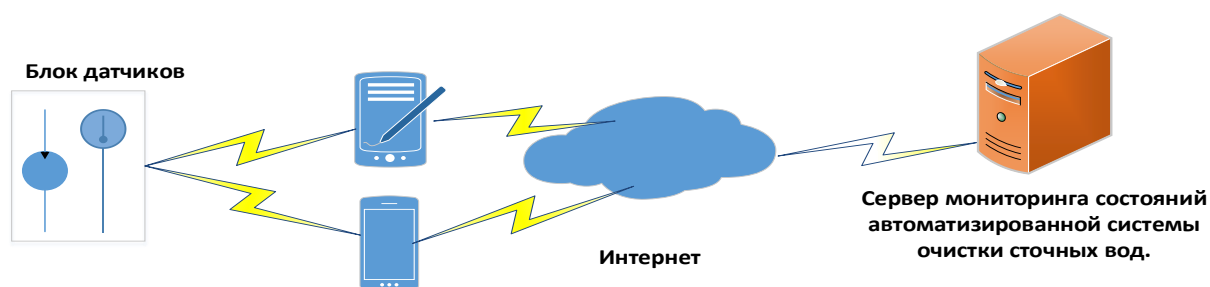


Рис. 23 – Блок-схема системы удаленного мониторинга состояний автоматизированной системы очистки сточных вод с помощью беспроводных датчиков.

3.7. Заключение

В последнее время возрастает интерес к использованию технологии очистки сточных вод с помощью вермифильтрации. Учитывая все более и более жесткие критерии и требования к качеству воды при очистке и утилизации сточных вод, технология вермифильтрации имеет ограничения. Необходимо проведение дальнейших исследований с целью усовершенствования технологии. Направления дальнейших исследований могут быть следующими:

1. Выбор вида дождевых червей. В будущем больше внимания должно уделяться правильному выбору видов дождевых червей, способных поглощать большие количества органических веществ из сточных вод и быть устойчивыми к высоким уровням влажности в среде обитания, при высоких концентрациях поллютантов, к пониженным температурам, экстремальным значениям pH среды и токсичным соединениям натрия и других элементов.

2. Подбор фильтрующих материалов. Некоторые фильтрующие материалы, которые обладают высокой адсорбционной способностью и могут эффективно улучшать процессы удаления поллютантов, должны быть испытаны и применены в составе вермибиофильтров. Например, в арабских странах можно будет использовать такие растительные отходы, как кокосовое волокно и измельченная сушеная скорлупа кокосовых орехов и сухие пальмовые листья.

Технология вермифильтрации не является альтернативой очистки сточных вод в азротенках, это способ получения технической воды, пригодной для ирригации, обогащенной органическими веществами, продуктами метаболизма дождевых червей. Результаты исследований показывают, что вермифильтрация может использоваться в качестве альтернативы традиционным способам очистки сточных вод.

В нашем исследовании планировалось разработать рекомендации для внедрения технологии вермифильтрации хозяйственных и бытовых сточных

вод для Султаната Оман. Анализ современных тенденций в развитии этих технологий позволил заключить, что все известные лабораторные, пилотные и промышленные установки функционируют в режиме ручного управления. Это является основным недостатком, так как отсутствует возможность контроля основных качественных параметров (t , pH , mS , O_2) очищаемых сточных вод в реальном масштабе времени, и, как следствие этого, отсутствие возможности управлять автоматически технологическим процессом очистки сточных вод в зависимости от качественных, количественных и режимных параметров технологического процесса.

Выводы:

1. В условиях жаркого климата, дефицита водных ресурсов и при небольших объемах сточных вод вермифльтрация может использоваться в качестве альтернативы традиционным способам очистки сточных вод. Внедрение технологии вермифльтрации в муниципальных и частных хозяйствах является актуальной задачей для Султаната Оман вследствие ограниченности его водных ресурсов.

2. Установлено, что одним из важнейших параметров продуктивного функционирования установки для вермифльтрации является скорость подачи сточных вод, регулируемая на основе мониторинга влажности вермифилтра, которая не должна превышать 80%.

3. Эффективность процесса вермифльтрации возрастает при пропускании через установку сточной воды в течение 10-14 дней, что способствует обрастанию наполняющих ее материалов биопленкой из микроорганизмов.

4. Вермикультура в составе вермифилтра при совместном взаимодействии с почвенными микроорганизмами, иммобилизованными на биофилтре, способна в результате механизмов поглощения и биodeградации удалять из сточных вод органические и неорганические загрязнители и улучшать такие важнейшие показатели качества воды как БПК₅ - более, чем

на 90%, ХПК — на 80-90%, растворённые вещества на 90-92% и ОВВ на 90-95%. Исчезновение неприятного запаха является очевидным преимуществом применяемой технологии.

5. Результаты эксперимента показывают, что технология вермифильтрации может успешно использоваться для сточных вод с очень высоким уровнем содержания органических веществ, когда показатель БПК находится в диапазоне величин от 1000 до 1500 мг О₂/дм³.

6. Использование электро-активированной воды «Анолит АНК» можно оценить, как новый безопасный и дешёвый способ дезинфекции сточных вод.

7. Разработана автоматизированная система удалённого мониторинга для управления очисткой сточных вод с помощью вермифильтрации с использованием беспроводных датчиков, способных в режиме on-line передавать значения важнейших параметров (РН, температура) на мобильные устройства в целях своевременного регулирования технологического процесса.

3.8. Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ

1. Титов И.Н., Фарзах Фаваз Салим Фатах, Н.П. Ларионов, В.М. Кан. Технология вермифильтрации – эффективный метод очистки бытовых и промышленных сточных вод. Обзор // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2014, №1. Стр. 58-70.
2. Титов И.Н., Фарзах Фаваз Салим Фатах, Ларионов Н.П. Очистка муниципальных сточных вод г. Владимира с помощью технологии вермифильтрации для получения дезинфицированной воды, пригодной для ирригации // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2017, № 4, Стр.
3. Титов И.Н., Фарзах Фаваз Салим Фатах, Ларионов Н.П. Очистка

муниципальных сточных вод г. Владимира с помощью технологии вермифильтрации // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2017, № 4, Стр.

Статьи в других научных изданиях

4. Титов И.Н., Фарзах **Фаваз Салим Фатах**, Белкин К.Б., Салех Х.М., Ларионов Н.П. / Очистка сточных вод г. Владимира с помощью технологии вермифильтрации // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина, 28-30 марта 2017 г., Краснодар: КубГАУ, 2017. Стр. 144-150.
5. Титов И. Н., Салех Х.М., Лысова Е.К., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**. Автоматизированная система вермифильтрации для очистки сточных вод. Патентная заявка на полезную модель РФ № 030416 от 19.05.2016 г.
6. Мельник І.П. Дощові черв'яки: наукові аспекти вирощування і практичне застосування. Монографія / І.П. Мельник, Н.М. Колісник, І.А. Шувар, В.М. Сендецький, І.М.Тітов, **Фарзах Фаваз Салім Фатах**. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2015. – 444 с. ISBN 978-966-286-071-9
7. Титов И.Н., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**. Инновационная биотехнология вермифильтрации для очистки сточных вод. Обзор // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные агротехнологии и средства механизации для развития органического земледелия», 2-3 декабря 2015, Рязань. Стр. 58-65. ISBN 978-5-87021-066-7
8. Titov I.N. Innovative Technology of Vermifiltration for the Treatment of Domestic and Industrial Wastewater. Review/ I.N. Titov, **Farzah Fawaz Salim Fatah** // Abstracts X International Symposium «Environmental, Engineering-Economic & Legal Aspects for Sustainable Living», 01.12 – 01.12.2015. Hannover, Germany. P. 73-74. ISBN 978-3-00, ISSN- 2193-3871.

9. Титов И.Н., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**. Вермифльтрация – инновационная биотехнология очистки сточных вод (обзор) // Материалы IV Международной научной экологической Конференции «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства», 24-25 марта 2015 года, Краснодар. Ч. II. Стр. 244-248. ISBN 978-5-94672-889-8
10. Титов И.Н., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**, Ларионов Н.П. Технология вермифльтрации – эффективный метод очистки бытовых и промышленных сточных вод // Материалы VIII Международного Конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития», Москва, 17-20 марта 2015 г. ISBN 5-7237-0372-2
11. Титов И.Н., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**, Ларионов Н.П. Инновационная технология вермифльтрации для очистки бытовых и промышленных сточных вод // Материалы XI Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ-2014, 1-3 июля 2014, Владимир-Суздаль, Россия. Стр. 292-296.
12. Титов И.Н., **Фарзах Фаваз Салим Фатах**, В.М. Кан. Инновационная технология очистки сточных вод с помощью вермифльтрации. Обзор // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист (Украина, Киев). 2014, 7. Стр. 137-142.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландин В.С. Фильтр для очистки жидкостей / В.С. Баландин // Заявка на изобретение № 94026790 от 05.07.1994.
2. Барне А.Ж. Оценка технологических качеств дождевого червя *Eiseniella tetraedra* для использования его в вермикультуре // Материалы II Международной конференции «Дождевые черви и плодородие почв», 17-19 марта 2004, Владимир. Иваново: «Х-Пресс», 2004. Стр. 17-18.
3. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ (ред. от 21 октября 2013) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 23. – Ст. 2381.
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году». – М.: Минприроды РФ, 2014. – 468 С.
5. ГОСТ 17.1.5.05-85 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. – М.: Издательство Стандартов, 1991
6. ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М.: Стандартинформ, 2008
7. ГОСТ 23268.9-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения нитрат-ионов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003
8. ГОСТ 3351-74. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2010.
9. ГОСТ Р 52708-2007 Вода. Метод определения химического потребления кислорода. – М.: Стандартинформ, 2013.
10. ГОСТ Р 54650-2011 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. – М.: Стандартинформ, 2013.

11. Жариков Г.А. Научно-методические основы биотехнологической переработки промышленных органических отходов и санации загрязнённых почв. Дисс. ... доктора биологических наук / Г.А.Жариков // Москва. 1998.
12. Калицун, В. И. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод: учебное пособие / В. И. Калицун, Ю. М. Ласков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1995. – 270 с.
13. Мельник І.П. Дошові черв'яки: наукові аспекти вирощування і практичне застосування. Монографія / І.П. Мельник, Н.М. Колісник, І.А. Шувар, В.М. Сендецький, І.М. Тітов, Фарзах Фаваз Салим Фатах // Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2015. – 444 с.
14. Мухин В.М. Разработка технологии и исследование свойств активного угля из антрацита / В.М. Мухин, П.И. Учанов, В.И. Панфилов, З.В. Вдовенко, А.Е. Бураков, Т.В. Гиматдинов // Химическая промышленность сегодня. 2015. № 6, с. 42-47.
15. Мухин В.М. Способ получения активного угля на основе антрацита / В.М. Мухин, С.Н. Соловьёв, Б.А. Дубовик, Е.И. Пупырев, Н.В. Лимонов, Н.И. Сотникова, П.В. Учанов // Патент РФ №2518964 заявка №2013102785 от 23.01.2013. БИ №16 от 10.06.2014.
16. Мухин В.М. Активный уголь на основе антрацита для процессов водоподготовки и водоочистки / В.М. Мухин, П.И. Учанов, Н.И. Сотникова, Л.П. Алексеева, А.А. Беляк, А.Н. Белевцев // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012. №12, с. 28-35.
17. Мухин В.М. Производство и применение углеродных адсорбентов: учебное пособие / В.М. Мухин, В.Н. Клушин // М. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2012. – 308 с.
18. О водоснабжении и водоотведении: закон Российской Федерации от 7 дек. 2011 г. № 416-ФЗ (ред. от 23 июля 2013 г.) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2011.– № 50. – Ст. 7358.
19. О федеральной целевой программе «Чистая вода» на 2011-2017 годы: постановление правительства Российской Федерации от 22 декабря 2010 г. №

1092 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2011. – № 4. – Ст. 603.

20. Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей : приказ Минприроды Российской Федерации от 17 декабря 2007 г. № 333 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2008. – № 22. – 2 июня.

21. Очистка сточных вод от взвешенных веществ и неорганических примесей. Т. 1 – Москва: НИЦ «Глобус». – 2007. – 81 с.

ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14 Количественный химический анализ вод.

22. Методика определения органического углерода и общего азота в питьевых, природных и сточных водах методом высокотемпературного окисления с использованием анализаторов углерода и азота / Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. - М., 2014 год.

23. ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода после n-дней инкубации (БПКполн) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах (с Изменениями и Дополнениями)

24. ПНД Ф 14.1:2.100-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений химического потребления кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. Москва. 1997 г. (издание 2004 г.).

25. СанПиН 2.1.7.573–96. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения.

26. Стом Д.И. Дождевые черви в переработке отходов. Монография / Д.И. Стом, Т.Ф. Казаринова, И.Н. Титов // Иркутск Изд-во ИГУ, 2012. - 146 с.

27. Сучков Ю.Г. Пути создания эффективных и безопасных антимикробных жидких средств и эволюция общественного восприятия дезинфекционных мероприятий / Ю.Г. Сучков, И.И. Стрельников, В.Г. Слискова, Б.И. Леонов,

- В.П. Ипполитов, В.М. Бахир. Дезинфекционное дело. №3, 2004. Стр. 52-57.
28. Технологии и оборудование для комплексной очистки сточных вод с использованием биологических методов. Т. 1. – Москва: НИЦ «Глобус», 2007. – 50 с.
29. Технологии и оборудование для комплексной очистки сточных вод с использованием биологических методов. Т. 2. – Москва: НИЦ «Глобус», 2007. – 82 с.
30. Титов И.Н. Инновационная биотехнология вермифiltrации для очистки сточных вод. Обзор / И.Н. Титов, Фарзах Фаваз Салим Фатах // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные агротехнологии и средства механизации для развития органического земледелия», 2-3 декабря 2015, Рязань. В печати.
31. Титов И.Н. Инновационная технология очистки сточных вод с помощью вермифiltrации. Обзор / И.Н. Титов // Материалы Международной научно-практической конференции «Безопасность и выживаемость населения в условиях переходного периода: проблемы и пути их решения», 23 ноября 2013 г., Киров. Стр. 44-49.
32. Титов И.Н. Вермикультура: инновационная технология очистки сточных вод/ И.Н. Титов // В сб.: Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в XXI веке: проблемы, перспективы, достижения. Труды III Международной научно-практической конференции. Минск, 10-14 июня 2013. Минск: УП Камет, 2013, с. 19-25.
33. Титов И.Н. Дождевые черви. Руководство в 2-х частях. Часть I: Компостные черви / И.Н. Титов // М.: ООО «МФК Точка опоры». 2012. 284 с.
34. Титов И.Н. Вермикультура: переработка органической фракции отходов / И.Н. Титов // Журнал ТБО, №8, 2008, с. 18-25.
35. Титов И.Н. Вермифiltrация – инновационная биотехнология очистки сточных вод (обзор) / И.Н. Титов, Фарзах Фаваз Салим Фатах // Материалы IV Международной научной экологической Конференции «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного

производства», 24-25 марта 2015 года, Краснодар. Ч. II. Стр. 244-248.

36. Титов И.Н. Инновационная технология вермифильтрации для очистки бытовых и промышленных сточных вод / И.Н. Титов, Фарзах Фаваз Салим Фатах, Н.П. Ларионов // Материалы XI Международной научной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ-2014, 1-3 июля 2014, Владимир-Суздаль, Россия. Стр. 292-296.

37. Титов И.Н. Технология вермифильтрации – эффективный метод очистки бытовых и промышленных сточных вод. Обзор / И.Н. Титов, Фарзах Фаваз Салим Фатах, Н.П. Ларионов, В.М. Кан // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А.Овчинникова. 2014, т.10. №1. Стр. 58-70.

38. Титов И.Н. Инновационная технология вермифильтрации очистки сточных вод. Обзор / И.Н. Титов, В.М. Кан, А.С. Сапаров // Почвоведение и агрохимия (Алматы, Казахстан). 2013. №3, стр. 85-90.

39. Титов И.Н. Вермикультура: инновационная технология вермифильтрации очистки сточных вод / И.Н. Титов, В.М. Усоев, Р.К. Синха // «Организм, физиологические функции и среда». Труды Международной научной конференции (заочной), посвященной памяти профессора Суворова В.В. - Владимир: Транзит-ИКС, 2013. Стр.179-187.

40. Титов И.Н. Инновационная технология вермифильтрации для очистки сточных вод / И.Н. Титов, В.М. Усоев, В.М. Кан // Сборник научных трудов VI Международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании», 17-18 мая 2013, Белово.

41. Титов И.Н. Способ очистки сточных вод / И.Н. Титов, В.М. Кан, Н.Н. Титов // Патент Республики Казахстан № 30997 от 11.03.2013.

42. Титов И.Н. Способ очистки сточных вод. / И.Н. Титов, О.В. Ириков // Патентная заявка РФ № 2013116627 от 11.04.2013 г.

43. Титов И.Н. Инновационная технология вермифильтрации для быстрой, рентабельной и экологически безопасной очистки сточных вод / И.Н. Титов, В.М. Усоев // В сб.: Экология и рациональное природопользование в XXI веке. Материалы научной конференции, 24 сент. 2012 г., Владимир. Стр. 198-

202.

44. Шубов, Л. Я. Технология отходов: учебник / Л. Я. Шубов, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник; под ред. Л. Я. Шубова. – Москва: Альфа-М; Москва: Уником Сервис; Москва: ИНФРА-М, 2011. – 348, [1] с.
45. Яковлев, С. В. Биологические фильтры / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1982. – 122 с.
46. Adugna A.T. Performance comparison of sand and fine sawdust vermifilters in treating concentrated grey water for urban poor / A.T. Adugna, H.A. Andrianisa, Y.Konate, A.Ndiaye and A.H. Maiga // *Environmental Technology*, 2015 <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2015.1046951>
47. Adugna A.T. Greywater treatment by vermifiltration for sub-Saharan urban poor / A.T. Adugna, H.A. Andrianisa, Y.Konate, A.Ndiaye and A.H. Maiga // *J. of Water, Sanitation and Hygiene for Development*. 2014; 4. Pp. 625-632.
48. Aguilera, M.L., 2003. Purification of Wastewater by Vermifiltration (Diss. Doctoral Thesis). University of Montpellier 2, p. 188.
49. Aira, M., Domínguez, J., 2009. Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *J. Hazard. Mater.* 161, 1234–1238.
50. Akhavan, M., Imhoff, P.T., Andres, A.S., Finsterle, S., 2013. Model evaluation of denitrification under rapid infiltration basin systems. *J. Contam. Hydrol.* 152, 18–34.
51. Arora, S., Kazmi, A.A., 2015. The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment. *Water Res.* 74, 88–99.
52. Arora, S., Rajpal, A., Bhargava, R., Pruthi, V., Bhatia, A., Kazmi, A.A., 2014a. Antibacterial and enzymatic activity of microbial community during wastewater treatment by pilot scale vermifiltration system. *Bioresour. Technol.* 166, 132–141.
53. Arora, S., Rajpal, A., Kumar, T., Bhargava, R., Kazmi, A.A., 2014b. A comparative study for pathogen removal using different filter media during vermifiltration. *Water Sci. Technol.* 70(6), 996–1003.
54. Arora S. Pathogen removal during wastewater treatment by vermifiltration /

- Arora, S., A. Rajpal, T. Kumar, R. Bhargava & A.A. Kazmi // *Environmental Technology*. 2014. Volume 35, Issue 19, pages 2493-2499.
55. Athanasopoulos, N., 1993. Use of earthworm biotechnology for the management of anaerobically stabilized effluents of dried vine fruit industry. *Biotechnol. Lett.* 15, 1281–1286.
56. Azuar, S.A. Comparison of Sand and Oil Palm Fibre Vermibeds in Filtration of Palm Oil Mill Effluent (POME) / S.A. Azuar, M.H Ibrahim // UMT 11th International Annual Symposium on Sustainability Science and Management, 09th – 11th July 2012, Terengganu, Malaysia. 2012, pp 1414-1419.
57. Bajsa, O. Vermiculture as a tool for domestic wastewater management / O. Bajsa, J. Nair, K. Mathew, G. Ho // *Water Science and Technology* 2003. 48 (11-12), 125-132
58. Bouché, M.B. Concrete contributions of earthworms in the environmental study / M.B. Bouché, J.P. Qiu // *Doc. Predozool. Int regol.* 1998. 3, pp 225–252.
59. Bouché, M.B. An industrial use of soil animals for environment: the treatment of organically polluted water by lumbrifiltration / M.B. Bouché, P. Soto // In: *Proceedings of the XIVth International Colloquium on Soil Zoology and Ecology*, University of Rouen, Mont Saint Aignan, France, August 30–September 3, 2004, pp. 1–13.
60. Bhargava R. Decentralized wastewater treatment by vermifiltration using river bed material / R. Bhargava, J.Verma, K.S.H.Prasad, T.Kumar // *International Conference on sustainable Built Environment*, 14-16 december 2012, Kandy, Sri Lanka.
61. Brown, G.G., 1995. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? In: *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity*. Springer, 170, 247–269.
62. Buyukgungor H, Gurel L (2009) The role of biotechnology on the treatment of wastes. *African Journal of Biotechnology* 8 (25), 7253-7262.
63. Comas, J., Alemany, J., Poch, M., Torrens, A., Salgot, M., Bou, J., 2003. Development of a knowledge-based decision support system for identifying

adequate wastewater treatment for small communities. *Water Sci. Technol.* 48, 393–400.

64. Dhadse S., P.R. Chaudhari, Shanta Satyanarayan and S. R. Wate. (2014) Vermitreatment of Pharmaceutical Wastewaters and Nutrient Bioassay of Treated Effluents for Reuse as Irrigation Water. *American J. Engineering Research*. Vol.3, Issue 8, pp-113-123.

65. Dhadse, S., Satyanarayan, S., Chaudhari, P., Wate, S., 2010. Vermifilters: a tool for aerobic biological treatment of herbal pharmaceutical wastewater. *Water Sci. Technol.* 61, 2375–2380.

66. Domínguez, J., 2004. 20. State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. *Earthworm Ecology*, second ed. CRC Press, Boca Raton, pp. 401–424.

67. Duclos, L. Lombrifiltration method and device for sanitising wastewater / L. Duclos, F. Fillit, P. Soto, D. Bruneau // Патент EP 2617685 A1 от 19.01.2012.

68. Edwards, C.A., Lofty, J.R., 1980. Effects of earthworm inoculation upon the root growth of direct drilled cereals. *J. Appl. Ecol.* 17, 533–543.

69. Elser, J.J., Acharya, K., Kyle, M., Cotner, J., Makino, W., Markow, T., Watts, T., Hobbie, S., Fagan, W., Schade, J., 2003. Growth rate–stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecol. Lett.* 6, 936–943.

70. Fang, C., Zheng, Z., Luo, X., Guo, F., 2010. Effect of hydraulic load on domestic wastewater treatment and removal mechanism of phosphorus in earthworm ecofilter. *Fresenius Environ. Bull.* 19, 1099–1108.

71. Garkal, D.J. & R.K. Jadhao. (2014) A Pilot scale study of vermi-biofilter (VBF) for residential quarter wastewater. *International Journal of Current Research in Chemistry and Pharmaceutical Sciences*. Vol.1, Issue: 6; Pages: 71-76.

72. Garg, P. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study / P. Garg, A. Gupta, S. Satya // *Bioresource Technology*, 2006. 97, 391-395.

73. Gajalakshmi, S., Ramasamy, E.V., Abbasi, S.A., 2001. Potential of two epigeic and two anecic earthworm species in vermicomposting of water hyacinth. *Bioresour. Technol.* 76, 177–181.
74. Ghatnekar SD, Kavian MF (2003) Utilisation of vermi-filter biotreatment plant to treat waste water from a sewage plant of a small town for irrigating agriculture. *Report on Case Studies of Ecosan Pilot Projects in India*, Version 1. September 14, 2006, pp 46-47.
75. Ghatnekar SD, Kavian MF, Ghatnekar GS (1995) Vermiculture-based effluent treatment plants in diverse industries. In: Ray SK (Ed) *Proceedings of Biotechnology Strategy for Development*, Biotek South Asia, 1994, New Delhi, pp 167-169.
76. Ghatnekar SD, Kavian MF, Ghatnekar MS, Ghatnekar SS (2000) Bio-management of wastewater from vegetable dehydration plant. In: Trivedy RK, Kaul SN (Eds) *Advances in Wastewater Treatment Technologies* (Vol 2), Global Science Publications, U.P., India, pp 19-26.
77. Ghatnekar SD, Ghalsasi DS, Tamhane BM (2009a) The novel three-tier biotechnology to convert solid waste of gelatine manufacturing unit into useful plant probiotics. *Indian Journal of Environmental Protection* 29 (9), 767-774.
78. Ghatnekar SD, Ghatnekar SS, Ghalsasi DS (2009b) Three-tier vermiculture biotechnology to treat bio-solid wastes into bio-clean probiotics for agriculture. *Proceedings of 14' European Biosolids and Organic Resources Conference, Seminar and Exhibition*, November 9-11, 2009, organized by Aqua Enviro Technology Transfer, The Royal Armouries, Leeds, UK, pp 1 -13.
79. Ghatnekar, S. D. Application of Vermi filter-based Effluent Treatment Plant (Pilot scale) for Biomanagement of Liquid Effluents from the Gelatine Industry / S.D. Ghatnekar, M.F. Kavian, S.M. Sharma, S.S. Ghatnekar, G. S. Ghatnekar, A.V. Ghatnekar // *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. 2010, Vol. 4 Special Issue 1, pp 83-88.
80. Hughes, R., Ho, G., Mathew, K., 2006. Conventional small and decentralised wastewater systems. Municipal wastewater management in developing countries:

principles and engineering. 134–167.

81. Hughes, R.J. The toxicity of ammonia/ammonium to the vermifiltration wastewater treatment process / R.J. Hughes, J. Nair, G. Ho // *Water Sci Technol.* 2008; 58(6):1215-20.

82. Hughes, R. J., Nair, J., & Ho, G. (2009). The risk of sodium toxicity from bed accumulation to key species in the vermifiltration wastewater treatment process. *Bio.Tech.* Vol. 100, Issue 16, 3815-3819.

83. Hughes, R.J. Toxicity of domestic wastewater pH to key species within an innovative decentralised vermifiltration system / R.J. Hughes, J. Nair, K. Mathew, G. Ho // *Water Sci Technol.* 2007; 55(7): 211-8.

84. Hawkins, C.L., Shipitalo, M.J., Rutledge, E.M., Savin, M.C., Brye, K.R., 2008. Earthworm populations in septic system filter fields and potential effects on wastewater renovation. *Appl. soil Ecol.* 40, 195–200.

85. Jian, Y., Su, W., Meiyang, X., Shanjie, L., 2009. Influence of Several Parameters for Converter Slag-Coal Cinder Filters on Phosphorus Removal from Domestic Wastewater, in: *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference on. IEEE, pp. 1–4.

86. Jiang L. The use of microbial-earthworm ecofilters for wastewater treatment with special attention to influencing factors in performance: A review / Luhua Jiang, Yunguo Liu, Xinjiang Hu, Guangming Zeng, Hui Wang Lu Zhou, Xiaofei Tan, Binyan Huang, Shaobo Liu, Simian Liu // *Bioresource Technology.* 2016; 200, 999-1007.

87. Jochi A. Challenges in the Design of a Community-based Vermifiltration System for Wastewater Treatment / A. Joshi, D. Reeve, L.N. Ngh, J.D. Orbell // 2nd IWA Specialized International Conference - Ecotechnologies for Wasterwater Treatment – EcoSTP2014, Verona, Italy.

88. Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2012a. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: a scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *J. Environ. Manage.* 113, 158–169.

89. Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2012b. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. *Technol. Soc.* 34, 295–302.
90. Kavian MF, Ghatnekar SD (1991) Biomanagement of dairy effluents using red earthworms (*Lumbricus rubellus*). *Indian Journal of Environmental Protection* 11 (9), 680-682.
91. Kavian MF, Ghatnekar SD, Kulkarni PR (1996) Biomanagement of paper mill sludge using culture of red American earthworms (*Lumbricus rubellus*). *Indian Journal of Environmental Protection* 16 (5), 330-333.
92. Kavian MF, Ghatnekar SD, Kulkarni. PR (1997) Plant level biodegradation of soyabean oil extraction sludge waste by *Lumbricus rubellus*. *Bioresearch Journal* July, 9-15.
93. Kaviraj. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms / Kaviraj, S. Sharma // *Bioresource Technology*, 2003. 90, 169-173.
94. Kharwade, A. M. Laboratory Scale Studies on Domestic Grey Water Through Vermifilter and Non-Vermifilter / A.M. Kharwade, I.P. Khedikar // *JERS*. 2011. Vol. II, Issue IV, pp. 35-39.
95. Komarowski, S., 2001. Vermiculture for sewage and water treatment sludges. *Water-Melb. Then Artarmon* 28, 39–43.
96. Krishnasamy, K. Vermifiltration systems for liquid waste management: a review / Krishnasamy, K., Nair, J. and Hughes, R.J // *Int. J. Environment and Waste Management*, 2013. Vol. 12, No. 4, pp.382-396.
97. Kumar, T., Bhargava, R., Prasad, K.S.H., Pruthi, V., 2015. Evaluation of vermifiltration process using natural ingredients for effective wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 75, 370–377.
98. Kumar, T., Rajpal, A., Bhargava, R., Prasad, K.S.H., 2014. Performance evaluation of vermifilter at different hydraulic loading rate using river bed material. *Ecol. Eng.* 62, 77–82.
99. Li, Y.Q. Method for preparing filtration material for earthworm biofilter / Y.Q.

Li // Patent CN 1843978. 2006.04.20.

100. Li Y.S. Vermifiltration as a stage in reuse of swine wastewater: Monitoring methodology on an experimental farm / Y.S. Li , P. Robin, D. Cluzeau, M. Bouché, J.P. Qiu, A. Laplanche, M. Hassouna, P. Morand, C. Dappelo, J. Callarec // *Ecological Engineering*, 2008, **32**, 301-309.

101. Li Y.S. Continuous village sewage treatment by vermifiltration and activated sludge process / Li Y.S., Xiao YQ, Qiu JP, Dai YQ, Robin P // *Water Science and Technology*. 2009. 60 (11), 3001-3010.

102. Li, X., Xing, M., Yang, J., Dai, X., 2014. Earthworm eco-physiological characteristics and quantification of earthworm feeding in vermifiltration system for sewage sludge stabilization using stable isotopic natural abundance. *J. Hazard. Mater.* 276, 353–361.

103. Li, Y., Zhang, F., Ai, X., Wang, X., Robin, P., Cavanagh, J., Matthew, C., Qiu, J., 2015. Antioxidant and behavior responses of earthworms after introduction to a simulated vermifilter environment. *Ecol. Eng.* 81, 218–227.

104. Liu, J., Lu, Z., Yang, J., Xing, M., Yu, F., 2009. Ceramsite-vermifilter for domestic wastewater treatment and reuse: an option for rural agriculture, in: *Energy and Environment Technology*, 2009. ICEET'09. International Conference on. IEEE, pp. 472–475.

105. Liu, J., Lu, Z., Yang, J., Xing, M., Yu, F., Guo, M., 2012. Effect of earthworms on the performance and microbial communities of excess sludge treatment process in vermifilter. *Bioresour. Technol.* 117, 214–221.

106. Liu, J., Lu, Z., Zhang, J., Xing, M., Yang, J., 2013. Phylogenetic characterization of microbial communities in a full-scale vermifilter treating rural domestic sewage. *Ecol. Eng.* 61, 100–109.

107. Malek, T.E.U.A. Vermifiltration of Palm Oil Mill Effluent (POME) / T.E.U.A. Malek, S. A. Ismail, M.H. Ibrahim // *UMT 11th International Annual Symposium on Sustainability Science and Management*, 09th – 11th July 2012, Terengganu, Malaysia. Pp. 1292-1297.

108. Makino, W., Cotner, J.B., Sterner, R.W., Elser, J.J., 2003. Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C: N: P stoichiometry. *Funct. Ecol.* 17, 121–130.
109. Manyuchi, M.M. Pilot Scale Studies for Vermifiltration of 1000 m³/day of Sewage Wastewater / M.M.Manyuchi, L. Kadzungura, S. Boka // *Asian J. Engineering and Technology*, 2013, vol. 1-4. pp 108-113.
110. Manyuchi, M. M. Vermifiltration of Sewage Wastewater for Potential Use in Irrigation Purposes Using *Eisenia fetida* Earthworms / M.M.Manyuchi, L. Kadzungura, S. Boka // *Asian J. Engineering and Technology*, 2013, vol. 1-4. pp 10-16.
111. Manyuchi, M. M. Application of the Vermifiltration Technology in Sewage Wastewater Treatment / M.M. Manyuchi, A. Phiri // *Asian Journal of Engineering and Technology*. 2013. Vol.1. Issue 4, pp. 108-113.
112. Mburu, N., Tebitendwa, S.M., van Bruggen, J.J.A., Rousseau, D.P.L., Lens, P.N.L., 2013. Performance comparison and economics analysis of waste stabilization ponds and horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater: a case study of the Juja sewage treatment works. *J. Environ. Manage.* 128, 220–225.
113. Molina, M.J., Soriano, M.D., Ingelmo, F., Llinares, J., 2013. Stabilisation of sewage sludge and vinasse bio-wastes by vermicomposting with rabbit manure using *Eisenia fetida*. *Bioresour. Technol.* 137, 88–97.
114. Molinos-Senante, M., Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernández-Sancho, F., Poch, M., 2012. Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: environmental and economic aspects. *Sci. Total Environ.* 427, 11–18.
115. Morand, P., Robin, P., Escande, A., Picot, B., Pourcher, A.M., Jiangping, Q., Yinsheng, L., Hamon, G., Amblard, C., Fievet, S., 2011. Biomass production and water purification from fresh liquid manure – Use of vermiculture, macrophytes ponds and constructed wetlands to recover nutrients and recycle water for flushing in pig housing. *Procedia Environ. Sci.* 9, 130–139.

116. Muga, H.E., Mihelcic, J.R., 2008. Sustainability of wastewater treatment technologies. *J. Environ. Manage.* 88, 437–447.
117. Nedwell, D.B., 1999. Effect of low temperature on microbial growth: lowered affinity for substrates limits growth at low temperature. *FEMS Microbiol. Ecol.* 30, 101–111.
118. Nie E. Tower bio-vermifilter system for rural wastewater treatment: bench-scale, pilot-scale, and engineering applications / E.Nie, D.Wang, M.Yang, X.Luo, C.Fang, X.Yang, D.Su, L.Zhou, Z.Zheng / *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2014. 12, pp. 1053-1064.
119. Philippe M. Extensive treatments for a piggery with minimal pollution / M/Philippe, P.Robin, G.Hamon, J.P.Qui, M.Douche, D.Cluzeau, J.Callarec // Presented at 1st Arcus Sino-French Scientific Seminar, Montpellier, FRA. 15.12. 2008. 2008. Pp.12-16.
120. Pierre, V., R. Phillip, L. Margnerite and C. Pierrette. (1982) Anti-bacterial Activity of the Haemolytic System from the Earthworms *Eisina foetida andrei*. *Invertebrate Pathology*, Vol. 40, No. 1, pp. 21-27.
121. Reinecke, A.J., Viljoen, S.A., 1990. The influence of feeding patterns on growth and reproduction of the vermicomposting earthworm *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Biol. Fertil. Soils* 10, 184–187.
122. Robin, P., Germain, P., Lecomte, M., Landrain, B., Li, Y., Cluzeau, D., 2011. Earthworm effects on gaseous emissions during vermifiltration of pig fresh slurry. *Bioresour. Technol.* 102, 3679–3686.
123. Safley, L.M., Westerman, P.W., 1992. Performance of a dairy manure anaerobic lagoon. *Bioresour. Technol.* 42, 43–52.
124. Sinha, R.K. Earthworms for safe and useful management of solid wastes and wastewaters, remediation of contaminated soils and restoration of soil fertility, promotion of organic farming and mitigation of global warming: A review / R.K.
125. Sinha, U. Patel, B.K. Soni, Zh. Li // *Journal of Environmental and Waste Management*, 2014. Vol. 1(1), pp. 11-25.
126. Sinha, R.K. Vermiculture revolution. The Technological Revival of Charles

Darwin's Unheralded Soldiers of Mankind / R.K. Sinha, D. Valani // Nova Sci. Pub. Inc. 2011. 328 P.

127. Sinha R.K. Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermi-filtration technology using earthworms / R.K. Sinha, G. Bharambe, P. Bapat // *Indian Journal of Environmental Protection*. 2007. 27 (6), 486-501.

128. Sinha, R.K., Bharambe, G., Chaudhari, U., 2008. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *Environmentalist* 28, 409–420.

129. Sinha, R.K., Herat, S., Valani, D., Chauhan, K., 2010. Earthworms-the environmental engineers: Review of vermiculture technologies for environmental management and resource development. *Int. J. Glob. Environ. Issues* 10, 265– 292.

130. Sinha R.K. Earthworms: nature's chemical managers and detoxifying agents in the environment: an innovative study on treatment of toxic wastewaters from the petroleum industry by vermifiltration technology / R.K. Sinha, V. Chandran, B.K. Soni, U. Patel, A. Ghosh // *The Environmentalist*. 2012, Vol. 32, Issue 4, pp 445-452.

131. Sinha R.K. Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization / R.K.Sinha, G.Bharambe, U. Chaudhari // *Environmentalist*. 2008. 28 (4), 409-420.

132. Sinha, K.S., Herat S., A., Sony B.K., C., Vinod, C., Brijal Kiranbhai, S., 2010. Vermiculture technology: reviving the dreams of Sir Charles Darwin for scientific use of earthworms in sustainable development programs. *Technol. Invest.* 1, 155–172.

133. Soto P. Treating organically polluted water e.g. domestic wastewater, by separating solid elements / P. Soto // France Patent 2921651-A1 or 2009-04-03.

134. Taylor, M. The treatment of domestic wastewater using small-scale vermicompost filter beds / M. Taylor, W.P. Clarke, P.F. Greenfield // *Ecological Engineering*, 2003, 21, pp. 197-203.
135. Schröder, P., Navarro-Aviñó, J., Azaizeh, H., Goldhirsh, A.G., Di Gregorio, S., Komives, T., Langergraber, G., Lenz, A., Maestri, E., Memon, A.R., 2007. Using phytoremediation technologies to upgrade waste water treatment in Europe. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 14, 490–497.
136. Siegrist, R.L., Tyler, E.J., Jenssen, P.D., 2000. Design and performance of onsite wastewater soil absorption systems, in: White Paper. Prepared for National Needs Conference, Risk-Based Decision Making For Onsite Wastewater Treatment. Washington University. St. Louis, Missouri. pp. 19–20.
137. Singh, N.K., Kazmi, A.A., Starkl, M., 2015. A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach. *Water Sci. Technol.* 71, 468–478.
138. Singhirunnusom, W., Stenstrom, M.K., 2010. A critical analysis of economic factors for diverse wastewater treatment processes: case studies in Thailand. *J. Environ. Eng. Manage.* 20, 263–268.
139. Taylor M. The treatment of domestic wasterwater using small-scale vermicompost filter beds / M.Taylor, W.P.Clarke, P.F.Greenfield // *Ecol. Eng.* 2003. 21, 197-203.
140. Telang S.K. Vermi-biofiltration. A low cost treatment for dairy wasterwater / S.K.Telang // *Internat. J. Advance Foundation and Research in Sci & Engineering*. 2015. Vol.1. Special Issue. Pp. 405-432.
141. Titov I.N. Innovative Technology of Vermifiltration for the Treatment of Domestic and Industrial Wastewater. Review/ I.N. Titov, Farzah Fawaz Salim Fatah // Abstracts X International Symposium «Environmental, Engineering-Economic & Legal Aspects for Sustainable Living», 01.12 – 01.12.2015. Hannover, Germany. Pp. 73-74.
142. Tomar, P. Urban wastewater treatment using vermi-biofiltration system / P.Tomar, S. Suthar // *Desalination*. 2011. Vol 28 no.2, pp. 95-10.

143. Urdaneta, C. Evaluation of vermicompost as bioadsorbent substrate of Pb, Ni, V and Cr for wastewaters remediation using total Reflection X-ray Fluorescence / C.L. Urdaneta, M. M. Parra, S. Matute, M. A. Garaboto, H. Barros, C. Vazquez // *In 12th International Conference on total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis and Related Methods*, Trento, ITALY. 2007, pp. 1455-1460.
144. Wang, L., Guo, Z., Che, Y., Yang, F., Chao, J., Gao, Y., Zhang, Y., 2014. The effect of vermifiltration height and wet: dry time ratio on nutrient removal performance and biological features, and their influence on nutrient removal efficiencies. *Ecol. Eng.* 71, 165–172.
145. Wang, L., Luo, X., Zhang, Y., Chao, J., Gao, Y., Zhang, J., Zheng, Z., 2013. Community analysis of ammonia-oxidizing Beta-proteobacteria at different seasons in microbial-earthworm ecofilters. *Ecol. Eng.* 51, 1–9.
146. Wang, L.M., Luo, X.Z., Zhang, Y.M., Lian, J.J., Gao, Y.X., Zheng, Z., 2013. Effect of earthworm loads on organic matter and nutrient removal efficiencies in synthetic domestic wastewater, and on bacterial community structure and diversity in vermifiltration. *Water Sci. Technol.* 68, 43–49.
147. Wang, S., Yang, J., Lou, S.J., 2010b. Wastewater treatment performance of a vermifilter enhancement by a converter slag–coal cinder filter. *Ecol. Eng.* 36, 489–494.
148. Wang, L. Performance and mechanisms of a microbial-earthworm filter for removing organic matter and nitrogen from synthetic domestic wastewater / L. Wang, Z. Zheng, X. Luo, J. Zhang // *Journal of Hazardous Materials*, 2011 (195), pp. 245-253.
149. Wang, L. Enhancement of rural domestic sewage treatment performance, and assessment of microbial community diversity and structure using tower vermifiltration / L. Wang, G. Feihong, Z. Zheng, L. Xingzhang, J. Zhang // *Bioresource Technology*; 2011, 102: 9462- 9470.
150. Wang S., Wastewater treatment performance of a vermifilter enhancement by a converter slag-coal cinder filter / Wang S., Yang J., Lou S., Yang J. // *Ecological Engineering*. 2010. 36 (4), 489-494.

151. Xavier A.M. Vermiculture for the treatment of dairy effluent / *J. International Academic Research for Multidisciplinary* // A.M.Xavier, A.Logeswari, S.Mano, M. Gan, T. Kannadasan. 2013. Vol. 3. Pp. 143-154.
152. Xia, S., Li, J., Wang, R., 2008. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor. *Ecol. Eng.* 32, 256–262.
153. Xing, M. Performance and mechanism of vermifiltration system for liquid-state sewage sludge treatment using molecular and stable isotopic techniques / M. Xing, X.Li, J.Yang, B.Lv, Y.Lu // *Chemical Engineering J.* 2012, 197. Pp. 143-150.
154. Xing, M. Treatment performance of small-scale vermifilter for domestic wastewater and its relationship to earthworm growth, reproduction and enzymatic activity / M. Xing, X. Li, J. Yang // *African Journal of Biotechnology*, 2010. 9(44), pp. 7513-7520.
155. Xing, M. A comparative study of synchronous treatment of sewage and sludge by two vermifiltrations using an epigeic earthworm *Eisenia fetida* / M.
156. Xing, J. Yang, Y. Wang, J. Liu, F. Yu // *Journal of Hazardous Materials*, 2011. 185, 881-888.
157. Xing M., Yang J., and Z. Lu. (2005) Microorganism-earthworm integrated biological treatment process: A sewage treatment option for rural settlement, ICID 21st European regional conference, 15-19 May 2005, Frankfurt.
158. Yang, J. Analysis on the Performance of Vermifilter at Low Temperature in Winter / J. Yang, S. Zhang, J. Yang, Z. Lu // ICEET 2009. International Conference on 16-18 Oct. 2009. Energy and Environment Technology, 2009. Vol. 3, 193 – 197.
159. Yang J. Ecological and Physiological Adaptabilities of Earthworm in Biofilter Under Domestication Stage / J.Yang, L. Zhao, Q. Chen, D. Yi // *J. of Tongji University*, 2009; 30 (8). Pp. 2358-2365.
160. Yang, J. Ecological and Physiological Adaptabilities of Earthworm in Vermifilter Under Different Hydraulic Loading / J. Yang, L. Zhao, Q. Chen, D. Yi

// J. of Tongji Univ. (Nat. Sci), 2009, vol. 8. Pp.

161. Yang, J., Wang, S., Lu, Z., Lou, S., 2009a. Converter slag–coal cinder columns for the removal of phosphorous and other pollutants. *J. Hazard. Mater.* 168, 331–337.
162. Yang, L., Chou, L.S., Shieh, W.K., 2001. Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. *Water Res.* 35, 3097–3108.
163. Yang, X., Luo, X., Zheng, Z., 2011. Tower Earthworm Ecofilter System for Rural Sewage Treatment in China, in: *Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on. IEEE*, pp. 1–4.
164. Yin, Z., Xing, M., Zhang, J., Yang, J., Huang, Z., 2011. Effect of filter bed temperature on municipal wastewater treatment efficiency by vermifiltration. *Energy Procedia* 11, 3446–3453.
165. Zhao, Y.J., Liu, B., Zhang, W.G., Ouyang, Y., An, S.Q., 2010. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands in responding to variation in influent C/N ratios of simulated urban sewage. *Bioresour. Technol.* 101, 1693–1700.
166. Zhao, Y.J., Yan, C., Li, Y.L., Li, J.H., Yang, M., Nie, E., Zheng, Z., Luo, X.Z., 2012. Effect of C/N ratios on the performance of earthworm eco-filter for treatment of synthetics domestic sewage. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19, 4049–4059.
167. Zhao, L., Yang, J., Yi, D., Deng, D., Xing, M., 2009. Effect of Vermibed Height on Excess Sludge Treatment in Vermifilter, in: *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference on. IEEE*, pp. 1–4.