

ФИТО-СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

АВТОРЫ:

Н.М.Щеголькова¹, В.Диас², Е.А.Криксунов³, К.Ю.Рыбка⁴

1 Ведущий научный сотрудник, д.б.н., Лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: nshegolkova@mail.ru, Тел. +7 499 7833115

2 Независимый консультант, Португалия, e-mail: verissimo.dias@gmail.com

3 Профессор, чл.-корр. РАН, биологический факультет, МГУ им. М.В.Ломоносова, e-mail: kriksunov@mail.ru, Тел. +7 495 939-37-92, +7 495 939-27-25

4 Аспирант, Лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: [ksenarybka@gmail.com](mailto:kseniarybka@gmail.com), Тел. +7 499 7833115

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы повышения качества поверхностных вод в России во многом зависит от обеспеченности малых и средних поселений высокоэффективными централизованными очистными сооружениями для бытовых стоков (Чижев, 2008).

Критерием эффективности систем водоподготовки и водоочистки является не только доля удаляемых загрязняющих веществ, но и удельные затраты энергии и ресурсов для очистки единицы объема сточной воды. Понятие «зеленых технологий», все больше входит в наш обиход. Такими технологиями называют те, что максимально используют процессы, созданные самой природой, так как именно эти процессы зачастую являются самыми энергоэффективными. Где возможна экономия материальных и энергетических ресурсов для систем водоподготовки и очистки воды?

Удорожание капитального строительства сооружений связано в основном с двумя причинами. Первая причина: ужесточение нормативов на сброс сточных вод. Например, удаление биогенных элементов еще не так давно не входило в обязательные функции очистных систем, а после ужесточения штрафных санкций за сброс нитритов, аммония и фосфатов все очистные сооружения реконструируются, вводя новые блоки по удалению биогенных элементов, и все новостроящиеся сооружения проектируются с учетом удаления этих элементов. Вторая причина: появление новых загрязняющих веществ, на которые не были рассчитаны старые технологии. Примером могут являться ксенобиотики, концентрации которых повышаются в окружающей среде при увеличивающемся разнообразии соединений.

Удельная стоимость новейших высокотехнологичных сооружений водоподготовки и водоочистки (мембранные системы, обратный осмос) значительно выше систем с отстойниками, аэротенками или фильтрами.

Эксплуатационные затраты на высокотехнологичных очистных сооружениях складываются не только из затрат электроэнергии и реагентов, но и из оплаты труда высококвалифицированным специалистам (которых еще и подготовить нужно!) Значительны капитальные затраты и на транспортировку сточной воды к месту ее очистки, то есть на строительство канализационной сети и насосных станций.

А можно ли снизить все эти затраты?

Путей для снижения затрат не так уж много. Например, очистку сточной воды от органических ксенобиотиков можно осуществлять не физическим способом, а биологическим, формируя специфический бактериоценоз, способный разложить токсичное вещество до безопасных компонентов. Но возникает проблема: как сделать процесс разложения стабильным и не зависящим от климатических условий.

Еще одним путем снижения стоимости очистки является уменьшение эксплуатационных расходов. Но можно ли обслуживать сооружения единичными работниками невысокой квалификации, а очистку осуществлять без применения реагентов и с небольшим расходом энергии?

Способ снизить капитальные затраты на строительство канализационной сети также есть. Если для агломерата, состоящего из множества маленьких поселений, не строить одно большое очистное сооружение вместе с сетью коллекторов, а построить несколько маленьких очистных сооружений для каждого поселения, то экономия будет складываться из стоимости земли под канализационную сеть, стоимости самой сети, насосных станций и, разумеется, эксплуатационных затрат на транспортировку. Известно, например, что эти затраты могут превышать затраты на саму очистку воды. Но возможно ли такое экономичное решение проблемы очистки воды, чтобы использовались природные процессы, не требовалось строительства сложной коллекторной сети, а обслуживание сооружения очистки состояло лишь в редких посещениях одного человека?

Наша статья посвящена как раз такой технологии, которая позволяет сэкономить ресурсы и энергию.

С 70-х годов 20 века в мире активно развивается очистка воды с применением *фито-очистных систем*. Данные технологии более известны как Constructed Wetlands (или Treatment wetlands, Reed bed systems) – буквально, искусственные или сконструированные болота. Учитывая тот факт, что самые современные примеры Constructed Wetlands уже не напоминают болота в общепринятом их понимании, авторы позволили себе ввести новый термин для русскоязычных специалистов, учитывая обязательное использование растительности как одного из основных компонентов ФОС. Тем более, что термин фитоочистка уже достаточно прочно укрепился в литературе. Например, в статье А.Мелехина и И.Щукина (2012) приводится описание *фитофильтров* для очистки поверхностных сточных вод. В статьях Тимофеевой С.С. с соавторами (1989, 1992, 2010, 2011, 2014) в результате многолетних исследований, проводимых в Иркутском государственном техническом университете, отработаны условия создания *фитозаградительных барьеров* для извлечения тяжелых металлов и органических ксенобиотиков из ливневых и промышленных вод. В работах Глазуновой И. с соавторами (2011, 2012) отмечается, что по эффективности очистки сооружения *фитотехнологии* не уступают дорогостоящим традиционным очистным сооружениям, а использование таких сооружений является действенным и перспективным методом очистки природных и сточных вод.

Цель статьи: доказать возможность и необходимость широкого применения технологии фито-очистки для условий России.

В статье проанализированы и систематизированы данные по использованию ФОС в разных странах, для разных стоков. Сделано обобщение по эффективности очистки воды четырех основных типов конструкций ФОС – по данным публикаций, а также на основании опыта конструирования и эксплуатации ФОС в странах Европы, Юго-восточной Азии, Южной и Северной Америки¹.

1. История развития и изучения фито-очистных систем.

Использование естественных фито-очистных систем. Очистка загрязненных стоков как отдельное технологическое и инженерное направление появилась в конце 19 – начале 20 веков. Наблюдения за природными процессами, происходящими с грязными стоками, однозначно свидетельствовали, что содержащиеся в них растворенные и взвешенные, органические и минеральные вещества за конечный период времени

¹ Последнее – на основе данных В.Диас.

переходят из воды в другие природные среды (в донные отложения, биомассу гидробионтов, почву, грунты, водные растения). Первыми очистными сооружениями явились сами природные объекты: реки, озера, моря и болота (при сбросе неочищенных стоков в водоприемники), а также почва и подпочвенные грунты (при выпуске стоков во временные водотоки и на ландшафт).

В России первыми сооружениями очистки стоков были поля фильтрации (орошения). Для этих, по сути природных, объектов получены обширные данные по эффективности очистки воды по взвешенным веществам, органическим соединениям, азоту и фосфору. В Северной Америке для очистки стоков использовались, в том числе, заболоченные территории. В конце 20 века применение природных болот, в качестве очистных систем в США было ограничено федеральным законом. Причина: отрицательное влияние стоков на популяции редких видов животных, недостаточная изученность процессов, происходящих в этих системах, негативное влияние на окружающую среду. Во многом этому способствовало переосмысление ценности *болотных систем* как важного фактора биоразнообразия, объекта для активного стока парниковых газов, а в конечном счете - компонента, поддерживающего *устойчивость биосферы в целом*.

Использование искусственных фито-очистных систем. Существует несколько обширных исторических обзоров использования фито-очистных систем (Kadlec & Knight, 1996; Kadlec et al, 2000; Kadlec & Wallace, 2008; Vymazal & Kröpfelová, 2008, V. Dias et al, 2013). В этих работах подробно описаны этапы развития данной технологии: от первых научных исследований в Европе в 1950-х годах, а в США в конце 1960-х годов до создания Руководств по проектированию таких систем (Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters Manual, 1999).

Концепция очистки сточных вод в ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком была разработана в Германии в 1970-х. Первый действующий ФОС был введен в эксплуатацию в 1974 году в Othfresen в Германии, и процесс очистки назывался "метод корневых зон" (RZM, на немецком Wurzelraumentsorgung) (Seidel, 1976). Система RZM состояла из покрытого пластиком ложа с надводными макрофитами, растущими в почве. Однако эти системы в результате низкой гидравлической проводимости почвенной среды, страдали от избыточного поверхностного стока, который ограничивал контакт сточных вод с ризосферой и их очистку. Проблему поверхностного стока позже удалось преодолеть в Великобритании за счет использования более пористой среды, например, гравия. Научно-исследовательская работа по разработке ФОС в США велась на протяжении 1970-х и 1980-х годов, со значительным участием Министерств и ведомств (Агентство США по охране окружающей среды - EPA, Министерство сельского хозяйства США). Использование ФОС в Северной Америке масштабно началось в начале 80-х годов 20 века. В настоящее время их число продолжает расти.

Важно отметить, что в 1970-х и 1980-х гг. они строились исключительно для очистки хозяйственно-бытовых или городских стоков. И лишь с начала 1990-х гг. начали использоваться для очистки всех типов сточных вод, включая фильтрат полигонов твердых бытовых отходов, ливневые стоки (например, городские, автомагистральные, стоки аэропортов и стоки с сельскохозяйственных угодий), стоки животноводческих предприятий, промышленные стоки (химическая, целлюлозно-бумажная промышленность и т.д.), шахтные воды и даже ФОС для избыточного активного ила.

В России имеется опыт использования ФОС в виде систем с открытой водной поверхностью. Это, так называемые, *пруды доочистки, биоплато* или *габионные очистные сооружения*, которые достаточно успешно очищают ливневые стоки или служат третичной очисткой для очистных сооружений с активным илом. Кроме того, действуют экспериментальные системы ФОС. Например, в рамках международного

проекта (Россия, Финляндия, Швеция, Нидерланды) в пос. Шонгуй Мурманской области было создано единственное в мире биоплато для очистки сточных вод за Полярным кругом (Верещагина, 2004). В условиях еще более низких среднегодовых температур ($-1,5^{\circ}\text{C}$) и морозных зим (до -53°C) эксплуатируется несколько систем подповерхностного и поверхностного стоков в Томской области (Семенов, 2008).

2. Классификация фито-очистных систем. Распространение ФОС по странам.

ФОС представляют собой искусственные системы, сконструированные и построенные для очистки сточных вод, состоящие из элементов аналогичных естественному природному ландшафту со встроенными техническими элементами. Главными признаками ФОС являются: 1) искусственно созданные водно-растительные сообщества для очистки воды; 2) наличие низкоскоростного потока воды от источника загрязнения к приемнику очищенных вод.

Вторая характеристика, несмотря на кажущуюся очевидность, весьма важна. Если время пребывания стоков в какой-либо природно-техногенной системе составляет недели и месяцы (как, например, в естественной болотной системе) и отсутствует сток очищенной воды (как объект для мониторинга), такую систему нельзя рассматривать как ФОС. Иными словами, время пребывания в ФОС имеет конечное и вполне определенное значение, которое может быть рассчитано достаточно точно.

Наиболее распространенной классификацией является деление ФОС на системы с открытой водной поверхностью и подпочвенные; среди последних – с вертикальным или горизонтальным потоком, или гибридные (Kadlec, 2009).

Анализ публикаций по ФОС позволяет классифицировать эти системы также по следующим признакам (рис. 1):

- по использованию естественных водных объектов в качестве блоков ФОС;
- по местоположению гидравлической проектной линии;
- по направлению потока воды;
- по типу фильтрующего и загрузочного материала;
- по использованию техногенных блоков, встроенных в систему;
- по типу искусственного растительного сообщества.

Распространение ФОС по странам

В настоящее время ФОС широко распространены практически во всех странах мира. Наибольшее их количество построено в Германии и США (десятки тысяч). В Австралии первые тысячи, в Европейских северных странах – сотни. Численность ФОС по странам Юго-Восточной Азии и Китаю не может быть оценена достаточно точно из-за недостатка данных. Известно, однако, что в этих странах фито-технологии активно развиваются.

3. Технологические особенности ФОС, их отличие от классических очистных сооружений с активным илом или прикрепленным биоценозом.

3.1. Гидравлическая нагрузка.

В ФОС вода движется в несколько раз медленнее, чем в классических очистных сооружениях. За время пребывания в несколько суток важными составляющими водного баланса становятся приход воды с осадками (учитывая, что ФОС – открытые системы), испарение и инфильтрация – факторы, которые практически не учитываются при проектировании классических ОС. Кроме того, есть специфический параметр водного баланса – эвапотранспирация.

Таким образом, уравнение водного баланса включает в себя большее число параметров, в отличие от классических очистных сооружений.

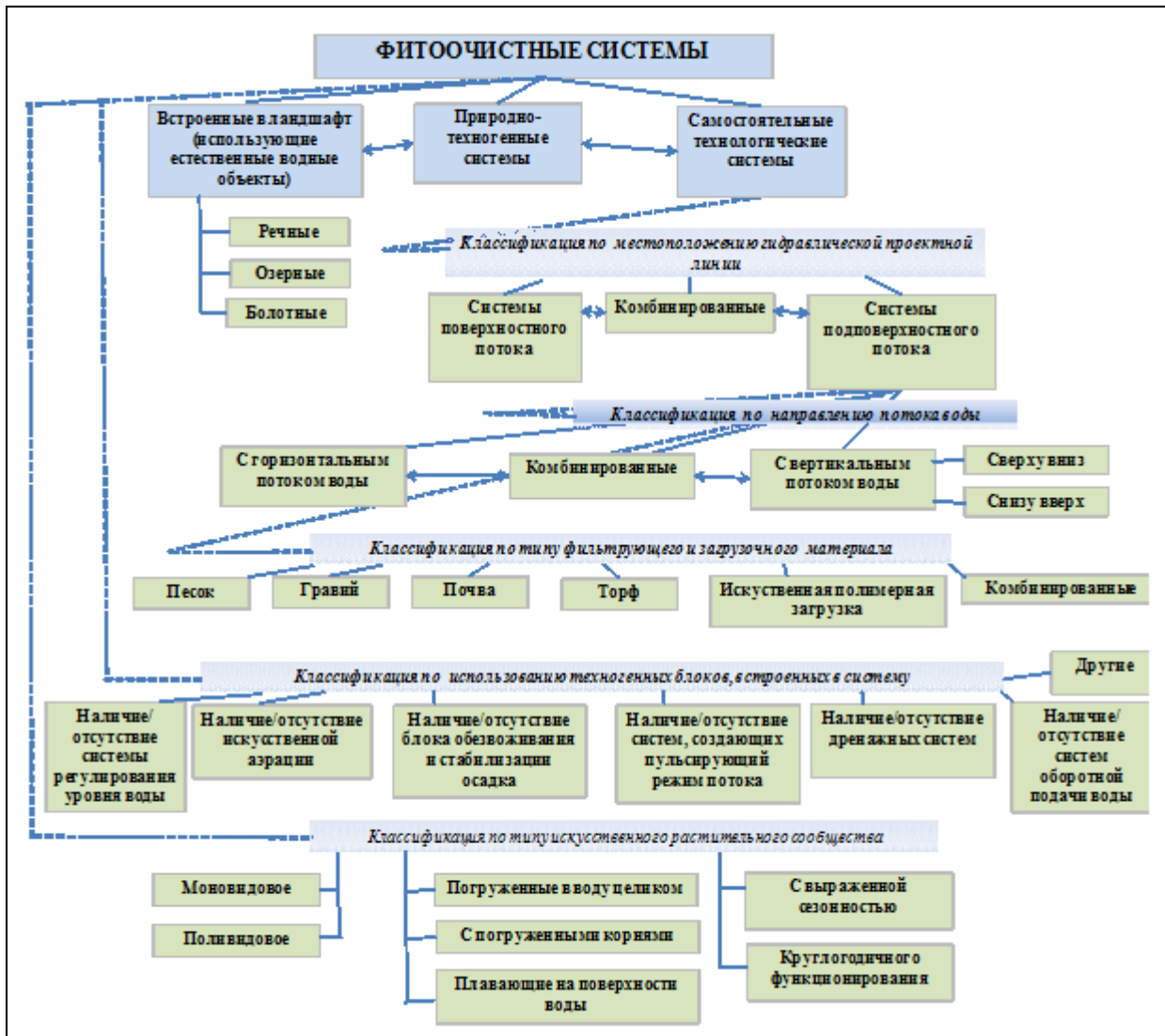


Рис. 1. Классификация ФОС

Гидравлическая нагрузка зависит от фильтрационных особенностей загрузки материала в случае систем подповерхностного потока. Инфильтрация рассчитывается в соответствии с законом Дарси. Особенностью некоторых ФОС является наличие зон с разными фильтрационными характеристиками, что позволяет создать зоны с наличием/отсутствием кислорода, зоны обезвоживания осадка, буферные зоны для стоков с переменной гидравлической нагрузкой.

3.2. Площадные характеристики

Для сравнения с классическими очистными сооружениями приведем следующие расчеты. Очистные сооружения Москвы (Курьяновские и Люберецкие) имеют общую площадь около 4 км². При численности Москвы в 12 млн. человек получаем 0,33 м² на 1 жителя. Эти расчеты сделаны без учета сооружений обработки осадка, площадей КНС и коллекторной сети. При учете всего вышеперечисленного площадь на 1 жителя возрастет примерно вдвое, т.е. – не менее 0,6 м². Удельная площадь ФОС изменяется в зависимости от того, к какой технологической группе относится сооружение. Максимальные площади необходимо для систем с открытой поверхностью: 3-10 м² на 1 жителя, минимальные площади, необходимые системам ФОС с вертикальным подповерхностным потоком и/или горизонтальным и гибридным системам принудительной аэрации – до 0,2 м².

Учитывая, что ФОС располагаются, как правило, вблизи источника загрязнения, площади под коллекторную сеть и КНС минимальны. Техничко-экономические расчеты ФОС обязательно должны учитывать этот фактор.

4. Структурные особенности разных типов ФОС.

ФОС делятся на четыре основных типа: ФОС со свободной водной поверхностью; ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком; ФОС с вертикальным подповерхностным потоком; комбинированные ФОС.

4.1. ФОС со свободной водной поверхностью.

ФОС со свободной водной поверхностью представляют собой участки открытой воды с плавающей растительностью, схожие по морфологии с естественными системами (преднамеренно или по условиям проектирования). В зависимости от местных условий и типа почвы для контроля потока и инфильтрации могут использоваться бермы, дамбы или непроницаемые мембраны. По мере того как сточные воды протекают через ФОС, они очищаются под влиянием процессов седиментации, фильтрации, окисления и восстановления, адсорбции и осаждения. Компоненты типичной ФОС со свободной водной поверхностью представлены на рис. 2. Так как ФОС со свободной водной поверхностью обладают чертами естественных водоемов, не удивительно, что они привлекают множество диких животных: насекомых, моллюсков, рыб, амфибий, рептилий, птиц и млекопитающих (Kadlec R.H., Knight R.L., 1996). Из-за риска потенциального воздействия на человека патогенных организмов ФОС со свободной водной поверхностью, согласно данным ЕРА, редко используются для вторичной очистки сточных вод. Наиболее часто такие системы применяются для доочистки стоков после вторичной и третичной обработки. ФОС со свободной водной поверхностью нередко применяются для очистки городских, сельскохозяйственных и промышленных ливневых стоков с переменной гидравлической нагрузкой. Они также часто используются для очистки шахтных и ремедиации подземных вод. Как мы уже отмечали, этот тип ФОС достаточно широко распространен в России.

4.2. ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком.

ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком состоят из гравийной или почвенной среды, засаженной специфической растительностью. Обычно они конструируются для основной очистки сточных вод, после чего стоки поступают на поверхность впитывающей среды (почвы) или в поверхностный водоприемник. Сточные воды находятся под поверхностью среды и проходят через зону корней и корневищ растений. Так как стоки во время очистки не экспонируются, то риск, связанный с воздействием патогенных микроорганизмов на людей или животных, минимален. Обычно ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком используются для вторичной очистки стоков в отдельно стоящих домах или небольших группах домов (Wallace and Knight, 2006), а также в мелких поселках (Cooper et al., 1996). ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком обычно состоят из впускной трубы, глинистой или синтетической мембраны, фильтрующей среды, растительности, берм и выпускной трубы с контролем уровня сточных вод. Устройство стандартной ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком (для условий теплого климата) приведено на рис. 2.

ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком можно эксплуатировать и в холодном климате, благодаря возможности изолировать верхнюю часть системы слоем торфа, мульчи. Основной сложностью в эксплуатации таких систем является риск засорения фильтрующей среды. Корни и корневища растений повышают водопроницаемость фильтрующего слоя и способствуют разложению органического вещества, откладывающегося на загрузке. Эффективность очистки в таких системах с течением времени значительно возрастает. В Европе успешно функционируют системы, построенные 40-50 лет назад и не подвергавшиеся реконструкции.

4.3. ФОС с вертикальным подповерхностным потоком.

Существует несколько вариаций ФОС с вертикальным подповерхностным потоком. В самом распространенном типе, который чаще всего применяется в Европе, используется поверхностное затопление среды (пульсирующая нагрузка) (ÖNORM B 2505, 1997) (рис. 2). Подобные системы являются грубой аналогией схемы дозирования, которая используется в биофильтрах периодического действия. ФОС с вертикальным подповерхностным потоком конструируются как рециркуляционные гравийные фильтры, засаженные растительностью (Lemon et al., 1996). Также существуют системы с вертикальным потоком снизу вверх, которые используются для минимизации перемещения кислорода, что способствует формированию восстановительных условий (Kassenga et al., 2004). Системы с пульсирующим потоком (fill-and-drain systems), которые распространены преимущественно в Северной Америке, предназначены для очистки сточных вод с высокой концентрацией загрязняющих веществ (в частности, для окисления аммиака) (Behrends, 1999b; Austin D.C., Lohan E., 2005). Эти системы можно совмещать с системами горизонтального подповерхностного потока или со свободной водной поверхностью с целью создать нитри-денитрифицирующие комплексы. Способность ФОС с вертикальным подповерхностным потоком окислять аммиак привела к тому, что они используются для очистки сточных вод, содержащих больше аммиака, чем городские или поселковые сточные воды. Фильтраты со свалок и сточные воды пищевой промышленности могут содержать сотни миллиграмм аммиака на литр, и понизить эти значения можно с помощью нитрификации. Поэтому ФОС с вертикальным подповерхностным потоком являются важной частью процесса очистки таких стоков (Burgoon et al., 1999). Другой вид ФОС с вертикальным подповерхностным потоком рассчитан на противоположный процесс – использование вышележащего слоя воды для блокировки доступа кислорода с целью создать анаэробные условия в нижней части системы. Вода на поверхности создает нисходящий поток в область восстановительных условий, которые благоприятствуют протеканию реакций гидролиза, денитрификации, метаногенеза, сульфатредукции (Younger et al., 2002).

С помощью ФОС с вертикальным подповерхностным потоком можно производить очистку сточных вод с очень высокой концентрацией загрязняющих веществ. Во французской версии технологии в систему добавляется вторичный осадок со станций биологической очистки с активным илом, и в системе происходит его обезвоживание (Molle et al., 2005a; Nielsen, 2004).

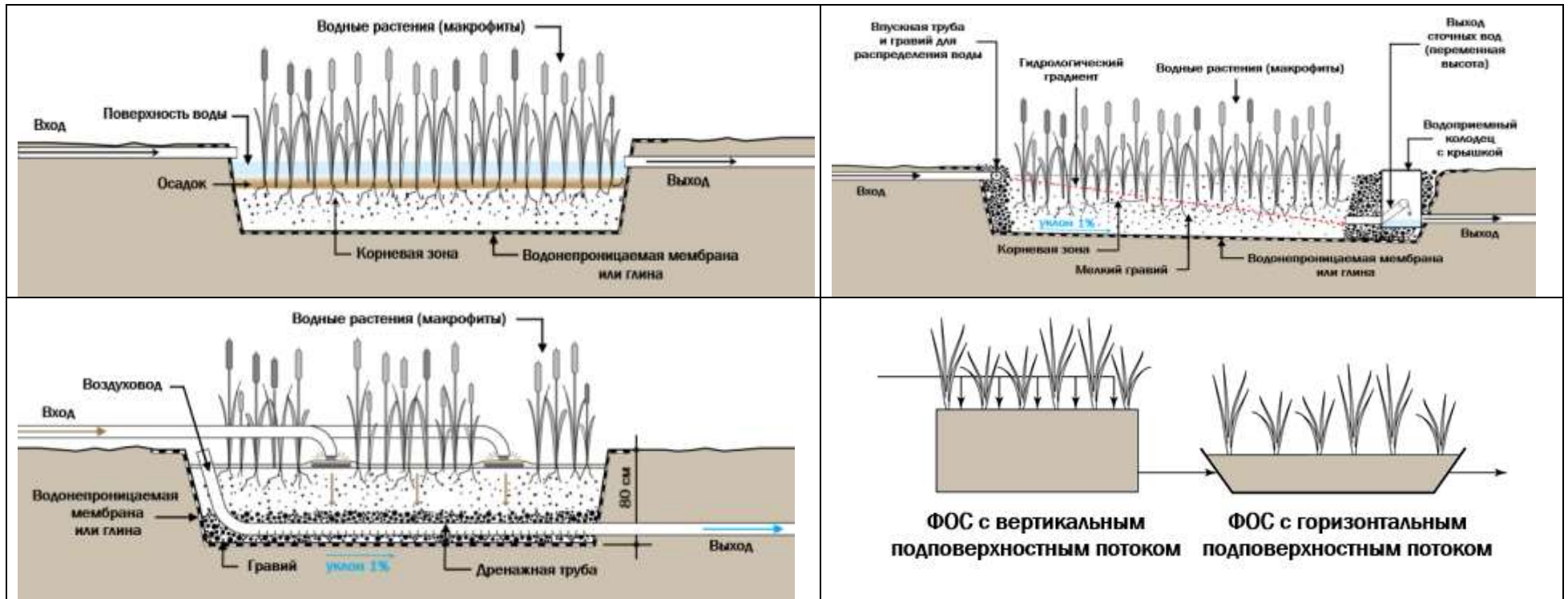


Рис. 2. Основные типы ФОС. 1 – ФОС со свободной водной поверхностью; 2 – ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком; 3 – ФОС с вертикальным подповерхностным потоком; 4 – комбинированные ФОС.

4.4. Комбинированные ФОС

Различные конструкции ФОС можно сочетать, чтобы добиться большей эффективности очистки. Большинство гибридных систем представляют собой комбинации систем с горизонтальным и вертикальным потоком (рис. 2). Наиболее распространённым вариантом является комбинация стадии вертикального потока, за которой следует ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком. В течение последних 15 лет эти системы вертикально-горизонтального потока были построены во многих европейских странах, например, в Словении [Urban-Bercic и Bulc, 1994], Норвегии [Mæhlum и Stålnacke, 1999], Австрии [Mitterer-Reichmann, 2002] и Ирландии [O'Hogain, 2003]. Гибридные системы получили широкое распространение в европейских странах из-за более строгих требований последних к удалению азота.

Также существуют альтернативные гибридные ФОС, состоящие из горизонтального потока и вертикальной ФОС [Johansen и Brix, 1996]. Сначала располагается горизонтальная ФОС, достаточно большая по площади, которая служит для удаления органики и взвешенных веществ, а также для денитрификации. Затем – небольшая ФОС с вертикальным потоком с пульсирующей нагрузкой для дальнейшего удаления органики и взвешенных веществ и для нитрификации. Часть очищенных сточных вод возвращается назад для рециркуляции и повторной денитрификации в горизонтальном потоке [Brix с соавт., 2003]. Схожие системы построены в Польше в Sobiechy [Ciura, 1996] и в Непале в городе Дхуликхел в сотрудничестве с австрийскими учёными [Laber с соавт., 1999].

Более поздние гибридные ФОС сочетают в себе различные типы систем, включая системы со свободной водной поверхностью. Пример такого подхода можно найти в деревне Кью (Кю) в Эстонии. Эта система состоит из двух ФОС с вертикальным потоком, которые сменяются горизонтальным потоком и двумя ФОС с открытой водной поверхностью [Mander с соавт. 2003]. В Италии гибридные ФОС с успехом применяются для очистки концентрированных стоков винных заводов [Masi с соавт., 2002]. ФОС в Орнеллайи в Италии состоит из двух систем с вертикальным потоком, за которыми следует горизонтальный поток и ФОС с открытой водной поверхностью. Система в Чекки в Италии состоит из ФОС с горизонтальным потоком, сменяемой ФОС с открытой водной поверхностью и прудом.

4. Процессы очистки воды в ФОС

Фотоавтотрофные организмы (растительность) – основа экосистем ФОС. В этом их главное отличие от классических очистных сооружений с активным илом (в классических очистных сооружениях автотрофами являются лишь бактерии-нитрификаторы – хемоавтотрофы, а также незначительная часть одноклеточных водорослей). Экосистема ФОС, таким образом, более сложная и состоит из автотрофных и гетеротрофных организмов. В ФОС можно выделить несколько «полноценных» (устойчивых во времени) трофических уровней по типу пастбищных (основа – биомасса фотоавтотрофов) и детритных (основа – детрит, «мертвое» органическое вещество) пищевых цепочек, в то время как в классических очистных системах – только детритные пищевые цепи.

Высшая растительность выполняет несколько важнейших функций в ФОС, что принципиально отличает ФОС от широко распространенных в России дренажных канав или дренажных колодцев, где также применяется гравий как основной агент

очистки. Растительность – это а) ассимилятор загрязняющих веществ (включение в биомассу), б) загрузка, на которой развиваются прикрепленные бактериальные ценозы: на корнях – в случае полупогруженных растений, на корнях, листьях и стеблях – в случае полностью погруженных растений; в) дополнительный источник автохтонного органического вещества (при отмирании) для процессов денитрификации, метаногенеза, биохимического окисления – крайне важных при удалении ксенобиотиков.

Органические соединения разлагаются в ФОС как в аэробных условиях, так и в анаэробных – бактериями, прикрепленными к подземным органам растений (корни, стебли, корневища) и к поверхности загрузки (гравий). Кислород, необходимый для аэробного разложения, поставляется или непосредственно из атмосферы путем диффузии или просачивания кислорода из корней и корневищ макрофитов в ризосфере (в случае ФОС без применения аэрации) и/или из аэрационных систем (в случае ФОС с применением принудительной аэрации).

Азот удаляется в ФОС путём нитрификации / денитрификации, процесса анаммокс и ассимиляции растениями. На основе исследования процессов в вертикальных и гибридных ФОС показано, что нитрификация, денитрификация, аммонификация и анаммокс происходят одновременно в большинстве этих систем (Vymazal, Kröpfelová, 2009). Однако степень проявления отдельных процессов отличается в разных системах.

Фосфор в ФОС удаляется в первую очередь с помощью обменных реакций на поверхности минеральной загрузки, где фосфат вытесняет воду или гидроксильные группы с поверхности гидроксидов Fe и Al. Тем не менее, среды, используемые для вертикальных ФОС (например, мелкий гравий, щебень), как правило, не содержат больших количеств Fe, Al или Ca и поэтому удаление фосфора, как правило, низкое. Аэробные условия более благоприятны для сорбции и соосаждения фосфора. Поэтому новейшие ФОС с применением принудительной аэрации позволяют соблюдать достаточно жесткие нормативы по содержанию фосфатов.

Известны многочисленные работы, свидетельствующие, что в ФОС активно удаляются *ксенобиотики*. Процесс удаления происходит за счет биохимических процессов, что подтверждается исследованиями по разложению ароматических соединений, нефтепродуктов, пестицидов и других органических поллютантов (Abira et al, 2005, Herrera-Melián et al, 2011). Эффективность удаления токсичной органики в ФОС увеличивается с возрастом сооружения, что свидетельствует о возможности формирования специфического бактериоценоза для каждой сточной воды. Новейшие биологические методы (секвенирование нового поколения, ПЦР, геочипы) позволяют оценивать структуру бактериоценоза и моделировать бактериоценоз с заданными свойствами.

Значительное время пребывания воды позволяет обеззараживать сточные воды в ФОС. *Обеззараживание* происходит за счет отмирания фекальных (патогенных и условно патогенных) бактерий в процессе сукцессиальных смен сообществ по мере продвижения воды от входа к выходу из ФОС, а также за счет потребления бактерий организмами обрастаний.

5. Проектирование, строительство и эксплуатация ФОС

Основные *принципы проектирования и эксплуатации ФОС* объединены в Руководящих документах ЕРА (Manual, 1999). Однако до сих пор остается множество распространенных заблуждений по принципам проектирования ФОС. Все документы являются, по сути, рекомендательными документами, а не жесткими технологическими регламентами.

В материалах ряда международных конференций, состоявшихся в последние годы, подведены предварительные итоги работ, проведенных учеными и практическими работниками различных стран и континентов (Kadlec, 2009; Dias et al, 2013a). Тем не менее, несмотря на огромный положительный опыт и большой объем накопленных эмпирических данных, остается много вопросов, возникающих в ходе проектирования и эксплуатации ФОС.

В литературе приводятся примеры расчетов разных ФОС с целью получения воды требуемого качества. Было показано, что эффективность удаления веществ в разных ФОС снижается в ряду: взвешенные вещества > БПК > азот > фосфор (Kadlec, 2009).

Эффективность очистки ФОС меняется с усложнением структуры системы (табл. 1). Наименее эффективными являются ФОС открытого типа, наиболее эффективными – ФОС гибридного типа (самые эффективные - с принудительной аэрацией). Качество очищенных стоков ФОС гибридного типа с принудительной аэрацией соответствует требованиям РФ для водоемов рыбохозяйственного назначения, содержание колиформных бактерий в выпусках гибридных ФОС может достигать значений СанПиН для стоков (V.Dias с соавт., 2013).

В случае, если ФОС проектируются для стран с наличием холодного сезона, то обязательной частью проектирования является *расчет теплового баланса* ФОС для определения мощности теплового изолирующего слоя, расположенного между слоем загрузки (гравий) и растительным слоем. Эта терморегулирующая прослойка может быть выполнена из различного рыхлого материала (торф, легкие почвы, опилки). Кроме того, делается расчет по регулированию уровня воды в слое гравия для разных сезонов. В зимний сезон уровень воды понижается, что создает дополнительный термоизолирующий слой из сухого гравия. ФОС достаточно эффективно работают круглый год на Аляске (США), Канаде, Германии, Ирландии, Швеции, Великобритании, Чехии и других странах с климатом, далеким от тропического.

Для разных стран разработано множество эмпирических коэффициентов, необходимых для проектных расчетов. Следует отметить, однако, что не существует единого подхода к проектированию и выбору типа ФОС. Это связано с тем, что в каждом конкретном случае учитывается не только качество входящих стоков и нагрузка, но и ландшафтные особенности территории. Именно поэтому предпроектные изыскания для строительства ФОС имеют большее значение, чем для классических очистных сооружений.



1



2



3



4



5



6



Рис. 3. Этапы строительства горизонтального ФОС с подповерхностным потоком и принудительной аэрацией.

6. Стоимость и дополнительные бонусы при использовании ФОС

Инвестиционные затраты на ФОС складываются из следующих позиций:

- стоимости земли,
- изыскательские работы,
- проектирование системы,
- земляные работы,
- стоимость прокладочного материала,
- стоимость загрузочного материала (гравий, песок, торф, почва),
- стоимость растительности (посадочные материал),
- стоимость блоков, управляющих потоком,
- стоимость аэрационных структур,
- стоимость блоков управления,
- прочие расходы (например, ограждения, подъездные пути, бытовки, системы мониторинга)

Крупные системы демонстрируют меньшую удельную стоимость. Например, в обзоре чешских исследователей (Vymazal & Kröpfelová, 2008) обобщаются имеющиеся данные по сооружениям подповерхностного потока в США, Чехии, Португалии, Испании и Португалии. Согласно данным авторам, расходы на земляные работы варьировали от 7 и 27,4% от капитальных затрат, в то время как стоимость засыпки от 27 до 53%, прокладочного материала (13-33 %) , стоимость растений (2-12 %), оборудование (6-12 %), управляющие структуры (3.1-5.7 %) и прочие (1.8-12 %). Стоимость меняется от 29 \$ за м² в Индии или 33 \$ за м² в Коста-Рике до 257 € за м² в Бельгии.

В целом, удельные капитальные затраты (к единице гидравлической нагрузки) для ФОС подповерхностного стока с применением технических блоков примерно такие же, как для обычных очистных сооружений с активным илом. Капитальные затраты для ФОС поверхностного потока, как правило, меньше, чем для ФОС подповерхностного потока. При этом ФОС имеют очень низкие эксплуатационные затраты и затраты на техническое обслуживание, в несколько раз ниже, чем классические очистные сооружения с активным илом.

Применение ФОС не ограничивается только очисткой сточных вод: высокая эффективность утилизации биогенных элементов высшими водными растениями и их продуктивность позволяют использовать их в качестве источника биомассы и полезных продуктов (Greenway & Woolley, 2001).

Кроме того ФОС не имеют запаха и могут располагаться вплотную к застройке.

Строительство ФОС наиболее предпочтительно в малых поселениях по причине того, что они могут экономить затраты на строительство коллекторной сети и насосных станций. ФОС могут быть построены для отдельных групп застройки без объединения стоков в единое крупное очистное сооружение.

Заключение

Главное отличие фито-очистных систем от других технологий очистки стоков в следующем.

- Биогеохимическая совместимость с природными ландшафтами, эстетическая привлекательность.
- Высокая надежность сооружений в течение длительного времени, повышение эффективности очистки со временем.

- Удаление загрязняющих веществ (в т.ч. ксенобиотиков) до нормативных требований за счет использования растительно-бактериальных сообществ.
- Отсутствие необходимости применения реагентов для очистки воды и для обеззараживания.
- Низкие эксплуатационные затраты, основанные на сравнительно незначительном энергопотреблении.
- Отсутствие необходимости применения высококвалифицированного персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелехин А., Щукин И. Достойная альтернатива. Использование фитофильтров для очистки поверхностных сточных вод / №11 (63) Ноябрь 2012 / ВодаMagazine. С. 6-9.
2. Тимофеева С., Ульрих Д. Инструмент минимизации экологических рисков. Использование фитотехнологий для очистки сточных и грунтовых вод от тяжелых металлов / ВодаMagazine. №6 (82) Июнь 2014 / С. 36-40.
3. Тимофеева С.С., Тимофеев С.С. Время биотехнологий. Системы с высшей водной растительностью для очистки сточных вод. // Вода Magazine. №10 (50), октябрь 2011. с.56- 62.
4. Тимофеева С.С., Русецкая Г.Д. Роль макрофитов в обезвреживании флотореагентов // Водные ресурсы. 1989. №4. с.187-194.
5. Тимофеева С.С., Бейм А.М. Роль макрофитов в обезвреживании хлорированных фенолов // Водные ресурсы. 1992. №1. с. 89 -91.
6. Тимофеева С.С., Тимофеев С.С., Медведева С.А. Биотехнологическая утилизация нефтешламов и буровых отходов // Вестник ИрГТУ, № 1, 2010. С. 158 -163.
7. Глазунова И., Раткович Л., Алиев М. Расчет оптимальных параметров. Методология использования биоинженерных сооружений в России и за рубежом / ВодаMagazine №52-декабрь 2011.
8. Глазунова И., Раткович Л. Когда цена не имеет значения. Применение локальных инженерных сооружений для более полного использования местных ресурсов водосбора // ВодаMagazine №60 -август 2012.
9. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters Manual - National Risk Management Research Laboratory; Office of Research and Development; U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio 45268 EPA/625/R-99/010. September. 1999.
10. Чижов С.Г. Как изменилась очистка сточных вод в России за последние 10 лет? / Россия в окружающем мире – 2008. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: аналитический ежегодник / Отв. ред. Н.Н. Марфенин; под общей редакцией Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2008. – С.97-119.
11. Kadlec R.H., Knight R.L. (1996) Treatment Wetlands. First Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida.
12. Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., and Haberl, R., 2000. Constructed Wetlands for Water Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation, IWA Scientific and Technical Report No. 8, London: IWA Publishing.
13. Kadlec, R.H., Wallace, S.D., (2008). Treatment Wetlands, Second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida. 1000 p.
14. Vymazal, J.; Kröpfelová, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008.

15. Seidel, K., 1976. Macrophytes and water purification, in: *Biological Control of Water Pollution*, J. Tourbier, and R.W. Pierson, eds., Pennsylvania University Press, Philadelphia, pp. 109-122.
16. Верещагина И.Ю., Василевская Н.В. Искусственное биоплато в Арктических широтах // *Экология производства*. 2004. № 4. С. 18–21.
17. Семенов С.Ю., Шелепова Л.И. Водно-болотная очистка сточных вод // *Безопасность жизнедеятельности*. 2008. № 1. С. 37–38.
18. Kadlec R.H. (2003) Integrated natural systems for landfill leachate treatment. In: *Wetlands - Nutrients, Metals, and Mass Cycling*, Vymazal J. (ed.) Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, pp. 1-33.
19. Kadlec, Robert H. *Treatment wetlands* / Robert H. Kadlec and Scott Wallace. (2009) - 2nd ed. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 978. LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. 1048 p.
20. Abira M.A., van Bruggen J.J.A., Denny P. (2005) Potential of a tropical subsurface constructed wetland to remove phenol from pretreated pulp and papermill wastewater. *Water Science and Technology* 51(9): 173-176.
21. Herrera Melián J.A., Martín-Rodríguez A.J., Araña J., González-Díaz O., Doña Rodríguez J.M., Pérez Peña J. Degradation and detoxification of p-nitrophenol by advanced oxidation technologies and bench-scale constructed wetlands / *Journal of Environmental Management* № 01. 2011. P.24-35.
22. Vymazal Jan , Kröpfelová Lenka. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience / *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 407 (2009) 3911-3922 p.
23. Bastian R.K., Hammer D.A. (1993) The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling. In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Moshiri G.A. (ed.) Lewis Publishers: Boca Raton, Florida, pp. 59-68.
24. Gutierrez-Sarabia A., Fernandez-Villagomez G., Martinez-Pereda P. Slaughterhouse wastewater treatment in a full-scale system with constructed wetlands // *Water Environment Research*. 2004. № 4. P. 334–343.
25. Brix H., Arias C.A., Johansen N.H. (2003) Experiments in a two-stage constructed wetland system: nitrification capacity and effects of recycling on nitrogen removal. In: *Wetlands - Nutrients, Metals, and Mass Cycling*, Vymazal J. (ed.) Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, pp. 237-258.
26. Butler J., Ford M.G., Loveridge R.F., May E. (1990) Design, construction, establishment and operation of gravel bed hydroponic (GBH) systems for secondary and tertiary sewage treatment. In: *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, Cooper P.F., Findlater B.C. (eds.) Pergamon Press: Oxford, United Kingdom, pp. 539-542.
27. Dias V.N., Martins-Dias S. (2003) Constructed wetlands for wastewater treatment: The Portuguese experience. Dias V., Vymazal J. (eds.) *Proceedings of the 1st International Seminar on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*, 8-10 May 2003; Instituto da Conservacao da Natureza and Instituto da Agua: Lisbon, Portugal, pp. 467-493.
28. Kadlec R.H. (2003) Integrated natural systems for landfill leachate treatment. In: *Wetlands - Nutrients, Metals, and Mass Cycling*, Vymazal J. (ed.) Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, pp. 1-33.
29. Greenway M., Woolley A. (2001) Changes in plant biomass and nutrient removal in a constructed wetland, Cairns, Australia. *Water Science and Technology* 44(11-12): P. 303-310.
30. Wallace S.D., Knight R.L. (2006) Small-scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, design criteria, and O&M requirements, Final Report, Project 01-CTS-5, Water Environment Research Foundation (WERF): Alexandria, Virginia.

31. Cooper P.F., Job G.D., Green B., Shutes R.B.E. (1996) Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. WRC Publications. 184 pp. plus data diskette: Swindon, United Kingdom.
32. ÖNORM B 2505 (1997) Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenklar-anlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb (Subsurface flow constructed wetlands - Application, dimensioning, installation, and operation), Österreichisches Normungsinstitut: Vienna, Austria.
33. Lemon E., Bis G., Rozema L., Smith I. (1996) SWAMP pilot scale wetlands: Design and performance, Niagara-on-the-Lake, Ontario, Canada. Presented at Constructed Wetlands in Cold Climates: Design, Operation, Performance Symposium; The Friends of St. George: Ontario, Canada.
34. Kassenga G., Pardue J.H., Moe W.M., Bowman K.S. (2004) Hydrogen thresholds as indicators of dehalorespiration in constructed treatment wetlands. *Environmental Science and Technology* 38: 1024-1030.
35. Behrends L.L. (1999b) Treating high strength aquaculture wastewater with reciprocating subsurface flow constructed wetlands. Presented at the Wetlands for Wastewater Recycling Conference in Baltimore, Maryland, United States; Environmental Concern, Inc.: St. Michaels, Maryland.
36. Austin D.C., Lohan E. (2005) Patent: Tidal vertical flow wastewater treatment system and method. United States US 6,863,816 B2. June 17, 2003.
37. Burgoon P.S., Kadlec R.H., Henderson M. (1999) Treatment of potato processing wastewater with engineered natural systems. *Water Science and Technology* 40(3): 211-215.
38. Younger P.L., Banwart S.A., Hedin R. (2002) *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publishers: London, United Kingdom.
39. Molle P., Liénard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A. (2005a) How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Water Science and Technology* 51(9): 11-21.
40. Nielsen S. (2004) Sludge reed bed facilities - operation and problems. Liénard A., Burnett H. (eds.) *Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 26-30 September 2004; Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE), Cemagref, and IWA: Avignon, France, pp. 203-210.
41. Urbanc-Bercic O., Bulc T. (1994) Integrated constructed wetland for small communities. Jiang C. (ed.) *Proceedings of the 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 6-10 November 1994; IWA: Guangzhou, P.R. China, pp. 138-146.
42. Mæhlum T., Stålnacke P. (1999) Removal efficiency of three cold-climate constructed wetlands treating domestic waste-water: Effects of temperature, seasons, loading rates and input concentrations. *Water Science and Technology* 40(3): 273-281.
43. Mitterer-Reichmann G.M. (2002) Data evaluation of constructed wetlands for treatment of domestic wastewater. *Proceedings of the 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 16-19 September 2002; IWA Publishing and University of Dar Es Salaam: Arusha, Tanzania, pp. 40-46.
44. O'Hogain S. (2003) The design, operation, and performance of a municipal hybrid reed bed treatment system. *Water Science and Technology* 48(5): 119-126.
45. Johansen N.H., Brix H. (1996) Design criteria for a two-stage constructed wetland. Chapter IX/3. *Proceedings of the 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*; Universität für Bodenkultur Wien: Vienna, Austria.
46. Ciupa R. (1996) The experience in the operation of constructed wetlands in North-Eastern Poland. *Proceedings of the 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*; Universität für Bodenkultur: Vienna, Austria, pp. IX/6.
47. Laber J., Haberl R., Shresta R. (1999) Two stage constructed wetland for treating hospital wastewater in Nepal. *Water Science and Technology* 40(3): 317-324.
48. Mander Ü., Teiter S., Lohmus K., Mauring T., Nurk K., Augustin J. (2003) Emission rates of N₂O, N₂, and CH₄ in riparian alder forests and subsurface flow constructed wetlands. In: *Wetlands - Nutrients, Metals, and Mass Cycling*, Vymazal J. (ed.) Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, pp. 259-280.

49. Masi F., Conte G., Marinuzzi N., Pucci B. (2002) Winery high organic content wastewater treated by constructed wetlands in Mediterranean climate. Mbwette T.S. A. (ed.) Proceedings of the 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 16-19 September 2002; IWA Publishing and University of Dar Es Salaam: Arusha, Tanzania, pp. 274-282.
50. V. Dias, E.A. Kriksunov, N.Shchegolkova. Introduction of constructed wetlands in Russia: a need / 5th International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control. October 13-17, 2013a Nantes (France). P. 276-277
51. V. Dias, E.A. Kriksunov, N.Shchegolkova. MULTI-FITOX–advanced wastewater treatment system using aquatic emergent macrophytes / 5th International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control. October 13-17, 2013b Nantes (France). P. 321