



# Природный механизм с техническими элементами

## Применение фито-сооружений для очистки сточных вод в различных климатических зонах

Очистка воды с применением фито-очистных систем развивается в мире с 70-х годов 20 века. Тогда эти системы были 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.

### История развития и изучения фито-очистных систем

**Использование естественных фито-очистных систем.** Первыми очистными сооружениями явились 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,

**Во многих странах на всех континентах получает все большее распространение использование фито-очистных сооружений для очистки сточных вод. Это объясняется тем, что такие системы, состоящие из элементов, аналогичных естественному природному ландшафту со встроенными техническими элементами, обладают весьма существенными преимуществами. В числе основных - обеспечение очистки стоков до нормативных требований за счет использования растительно-бактериальных сообществ, высокая надежность в течение длительного времени, низкие эксплуатационные затраты.**

1996; Kadlec et al, 2000; Kadlec & Wallace, 2008; Vymazal & Kropfelova, 2008, V. Dias et al, 2013).

Концепция очистки сточных вод в ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком была разработана в Германии в 1970-х. Первая действующая ФОС была введена в эксплуатацию в 1974 году в Отфрезене (Othfresen) в Германии, и процесс очистки назывался «метод корневых зон» (RZM, на немецком - Wurzelraumsorgung) (Seidel, 1976). Система RZM состояла из покрытого пластиком ложа с надводными макрофитами, растущими в почве. Однако эти системы из-за 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 решить в Великобритании за счет использования более пористой среды, например, гравия. Научно-исследовательская работа по разработке ФОС в США велась на протяжении 70-80-х гг. с участием различных министерств и ведомств. Использование ФОС в Северной Америке масштабно началось в начале 80-х гг. 20 века, и сейчас активно развивается.

Важно отметить, что в 70-80-х гг. ФОС строились исключительно для очистки хозяйственно-бытовых или городских стоков. И лишь с начала 90-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 промышлен-

ность и т.д.), шахтные воды и даже 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 третьей 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 создано единственное в мире биоплато для очистки сточных вод за Полярным кругом (Верещагина, 2004). В условиях еще более низких среднегодовых температур (-1,5°C) и морозных зим (до -53°C) эксплуатируется несколько систем подповерхностного и поверхностного стоков в Томской области (Семенов, 2008).

### Классификация и 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 искусственно созданные водно-растительные сообщества для очистки воды и наличие низкоскоростного потока воды от источника загрязнения к приемнику очищенных вод.

Второй признак, несмотря на кажущуюся очевидность, весьма важен. 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 загрузки материала;
- по использованию техногенных блоков, встроенных в систему;
- по типу искусственного растительного сообщества.

В настоящее время ФОС широко распространены практически во всех странах мира. Наибольшее их количество построено в Германии и США, где насчитывается десятки тысяч таких сооружений, в Австралии - тысячи, в европейских северных странах - сотни. Количество ФОС по странам Юго-Восточной Азии и Китаю не может быть оценено достаточно точно из-за недостатка данных. Известно, однако, что в этих странах фито-технологии активно развиваются.

**Технологические особенности ФОС**

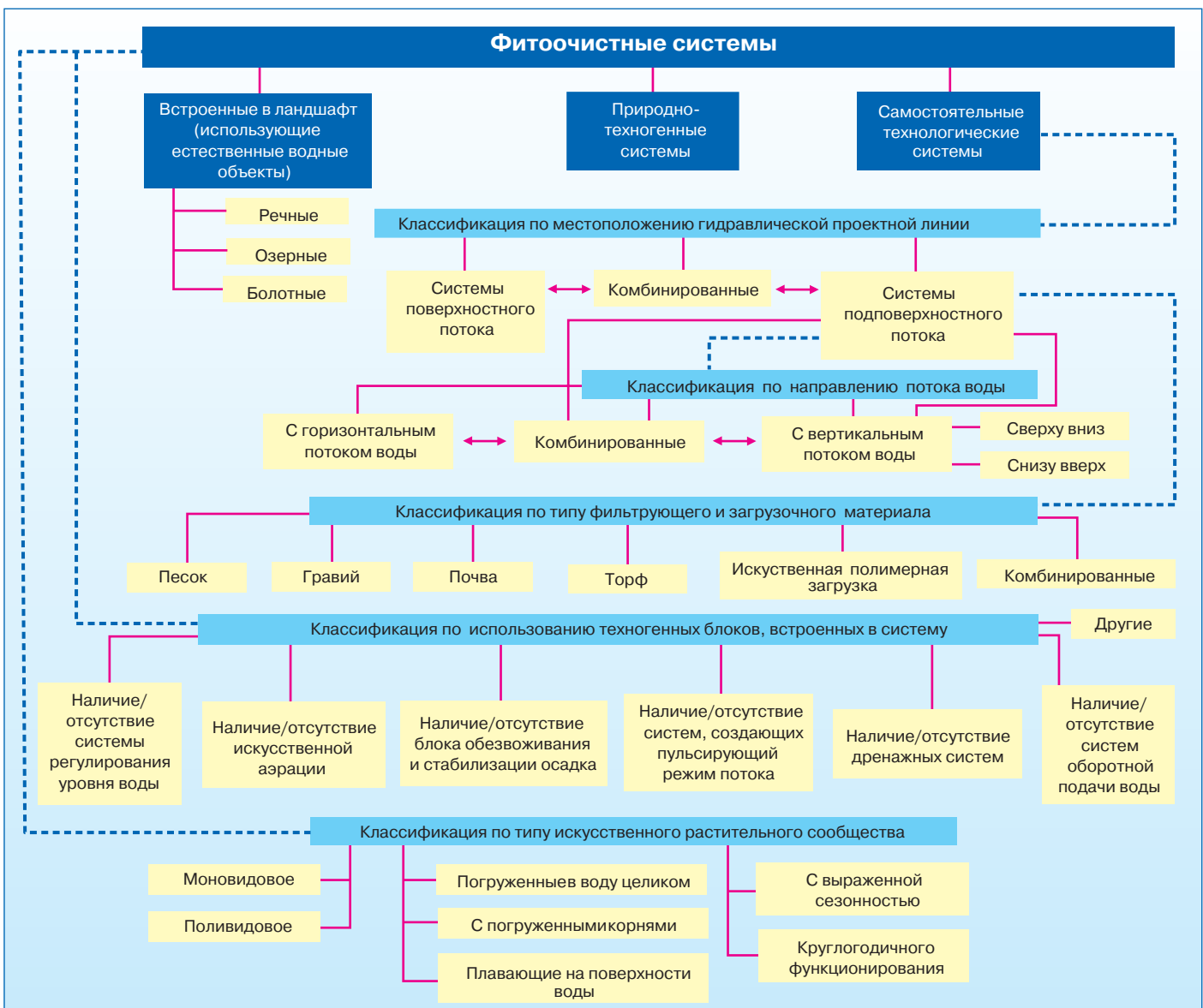
**Гидравлическая нагрузка.** В ФОС вода движется в несколько раз медленнее, чем в классических очистных сооружениях. За время

пребывания в течение нескольких 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, в отличие от классических очистных сооружений, включает в себя большее число параметров.

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/от-

■ Рис. 1. Классификация ФОС







сутствием кислорода, зоны обезвоживания осадка, буферные зоны для стоков с переменной гидравлической нагрузкой.

**Площадные характеристики.** Для сравнения с классическими очистными сооружениями приведем следующие расчеты. Очистные сооружения Москвы (Курьяновские и Люберецкие) имеют общую площадь около 4 км<sup>2</sup>. При численности Москвы в 12 млн. человек получаем 0,33 м<sup>2</sup> на 1 жителя. Эти расчеты сделаны без учета сооружений обработки осадка, площадей КНС и коллекторной сети. При учете всего вышперечисленного площадь на 1 жителя возрастает примерно вдвое, т.е. не менее 0,6 м<sup>2</sup>. Удельная площадь ФОС изменяется в зависимости от того, к какой технологической группе относится сооружение. Максимальные площади, необходимые для систем с

открытой поверхностью, - 3-10 м<sup>2</sup> на 1 жителя, минимальные площади, необходимые системам с вертикальным подповерхностным потоком и принудительной аэрацией, - до 0,2 м<sup>2</sup>.

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

#### **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 во-

дорослей). Экосистема ФОС, таким образом, состоит из автотрофных и гетеротрофных организмов.

Очистка воды от биогенных элементов в ФОС происходит не только за счет процессов биохимического окисления, нитрификации/денитрификации, но и за счет ассимиляции биогенов растительной биомассой. Вообще же высшая растительность выполняет функцию не только «ассимилятора» загрязняющих веществ, но и «загрузки», на которой развиваются прикрепленные бактериальные ценозы. Органические соединения разлагаются в ФОС как в аэробных условиях, так и в анаэробных.

Азот удаляется в ФОС путем нитрификации / денитрификации, процесса анаммокс и ассимиляции растениями. Основным механизмом удаление азота в ФОС с подповерхностным стоком является нитрификация / денитрификация.

На основе опыта с вертикальными ФОС показано, что нитрификация, денитрификация и аммонификация происходят одновременно в большинстве этих систем (Vymazal, Kropfelova, 2009). Однако степень проявления отдельных процессов отличается в разных системах.

Фото-автотрофы позволяют экономить электроэнергию и снижать затраты на реагенты. Известно, что для успешного протекания денитрификации в очистных сооружениях очень часто не хватает доступного бактериям органического вещества. В ФОС это органическое вещество создается растениями за счет использования солнечного света и углекислого газа атмосферы, растения в качестве питания используют часть минерального азота (как аммонийного, так и окисленных форм).

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 большие количества 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 соедине-





ний, нефтепродуктов, пестицидов и других органических поллютантов (Abira et al, 2005, Herrera-Melian 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 бактерий в процессе сукцессиальных смен сообществ от входа воды к выходу из ФОС, а также за счет потребления бактерий перифитонными организмами.

**Структурные особенности разных типов ФОС и особенности проектирования.**

ФОС делятся на четыре основных типа:

1. Со свободной водной поверхностью (FWS).
2. С горизонтальным подповерхностным потоком (HSSF).
3. С вертикальным подповерхностным потоком (VSSF);
4. Комбинированные (hybrid CW).

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, неудивительно, что они привлекают множество диких животных (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.

ФОС со свободной водной поверхностью могут использоваться практически в любых климатических условиях, включая северные регионы. Однако образование льда и низ-

кие температуры могут замедлить некоторые процессы очистки (особенно это касается процессов превращения азота). Другие процессы (например, удаление взвешенных частиц) подо льдом идут даже более эффективно, чем в летнее время. В целом ФОС со свободной водной поверхностью можно эффективно использовать в зимний период для накопления сточных вод, а в теплое время года - непосредственно для их очистки.

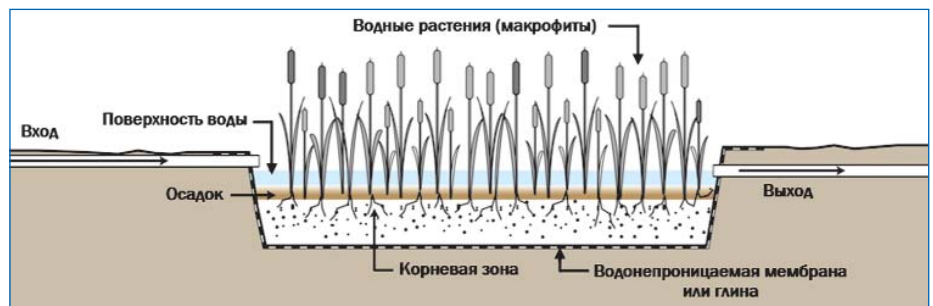
ФОС со свободной водной поверхностью нередко применяются для очистки городских, сельскохозяйственных и промышленных ливневых стоков с переменной гидравлической нагрузкой. Они также часто используются для очистки шахтных и ремедиации подземных вод.

ФОС рассматриваемого типа могут выполнять дополнительную функцию (кроме очистной) как привлека-

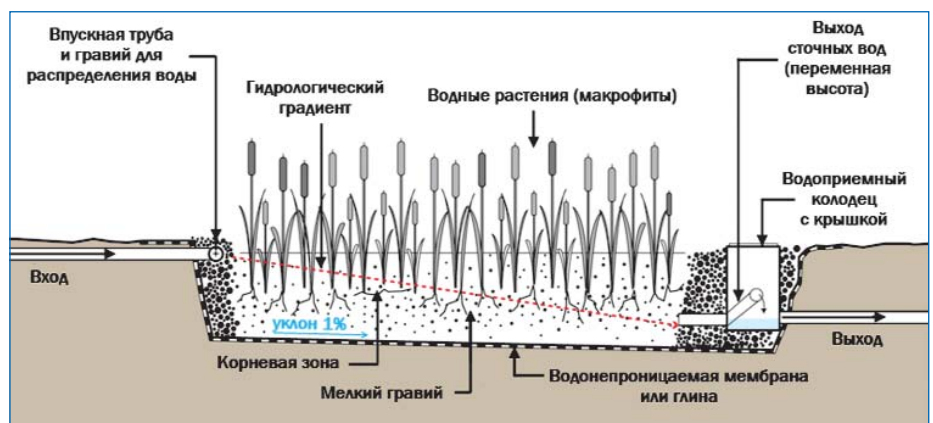
тельное местообитание некоторых видов диких животных. По эксплуатационным расходам - это наименее затратный вариант очистного сооружения. Как мы уже отмечали, этот тип ФОС достаточно широко распространен в России.

ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком состоит 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. При надлежащей эксплуата-

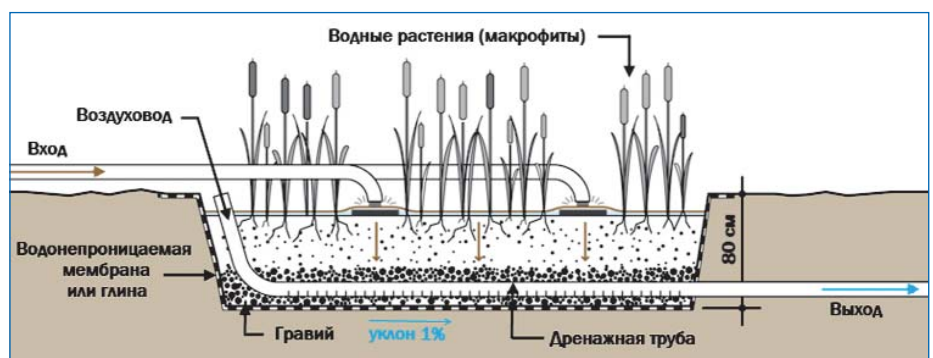
■ Рис. 2. ФОС со свободной водной поверхностью



■ Рис. 3. ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком



■ Рис. 4. ФОС с вертикальным подповерхностным потоком





**Таблица 1.** Расход энергии разных типов очистных сооружений (Kadlec, 2009 с дополнениями)

Система	Потребляемая энергия (кВ час/м <sup>3</sup> )
ФОС поверхностного потока (без технических блоков)	< 0.1
ФОС подповерхностного потока (без технических блоков)	< 0.1
ФОС лагунного типа + быстрая фильтрация	0.11
ФОС лагунного типа + поверхностный сток	0.16
ФОС подповерхностного потока с аэрацией	0.16
ФОС переменной гидравлической нагрузки (наполнение-фильтрация)	0.18
Система полной биологической очистки с активным илом карусельного типа	0.51
Биофильтр + удаление азота	0.61
Активный ил + нитрификация	0.76
Очистное сооружение с удалением биогенов модульного типа	1.06
Набор реакторов периодического действия	1.13
«Живые машины» - система очистки с применением нескольких трофических уровней (Solar Aquatics Systems)	1.51

ции такие системы также не являются подходящей средой для размножения moskitov.

Как правило, ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком дороже, чем ФОС со свободной водной поверхностью, однако эксплуатационные расходы все же довольно низкие. 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).

Такие ФОС 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 показано на рис. 3.

Системы данного типа используются, как правило, для вторичной очистки сточных вод. В индивидуальных хозяйствах первичная очистка осуществляется при помощи септика. Полностью очищенные стоки поступают на поверхность дисперсной среды (почвы) и просачиваются внутрь.

ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком можно эксплуатировать в холодном климате, благодаря возможности изолировать верхнюю часть системы. 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 возрастает. В Европе успешно функционируют системы, построенные 40-50 лет назад и не

подвергавшиеся реконструкции.

ФОС с вертикальным подповерхностным потоком бывают в нескольких вариациях. В самом распространенном типе, который чаще всего применяется в Европе, используется поверхностное затопление среды (пульсирующая нагрузка) (ONORM B 2505, 1997, см. рис. 4).

Подобные системы являются грубой аналогией схемы дозирования, которая используется в биофильтрах периодического действия. Такие ФОС 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 (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).

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. 5). Наиболее распространенным 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 [M?hlm и Stalnacke, 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 Sobiechu [Ciura, 1996] и в Непале в городе Дхуликхел в сотрудничестве с австрийскими учеными [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 Орнеллаи (Италия) состоит из двух систем с вертикальным потоком, за которыми следует горизонтальный поток и ФОС с открытой водной поверхностью. Система в Чекки (Италия) состоит из ФОС с горизонтальным потоком, сменяемой ФОС с открытой водной поверхностью и прудом.

Основные принципы их проектирования и эксплуатации объединены в руководящих документах Европейского агентства по охране окружающей среды (ЕРА.) Однако до сих пор остается множество распространенных заблуждений по принципам проектирования ФОС. Все документы являются, по сути, рекомендательными, 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). 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 следующем ряду: взвешенные вещества > БПК > азот > фосфор. Эффективность очистки ФОС меняется с усложнением структуры системы (таблица 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).

ФОС могут обеспечить первичную, вторичную и третичную очистку хозяйственно-бытовых, промышленных и сельскохозяйственных сточных вод. Наибольшая трудность для раз-

работки единых принципов по проектированию ФОС гибридного типа связана с недостатком данных по функционированию отдельных блоков в разных климатических условиях.

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.

Для разных стран разработано множество эмпирических коэффициентов, необходимых для проектных расчетов. Не существует единого подхода к проектированию и выбору типа ФОС. Поэтому предпроектные изыскания для строительства ФОС имеют большее значение, чем для классических очистных сооружений.

#### **Энергозатратность ФОС**

Кадлек (Kadlec, 2009) в обзоре по ФОС приводит энергозатратность ФОС в сравнении с разными типами очистных сооружений. Очевидно, что ФОС имеют энергозатраты в несколько раз меньшие, чем классические очистные сооружения с активным илом и биофильтрами (таблица 1).

#### **Стоимость и дополнительные бонусы при использовании ФОС**

Затраты на ФОС складываются из стоимости земли, изыскательских работ, проектирования системы, земляных работ, стоимости прокладочного материала, стоимости загрузочного материала (гравий, песок, торф, почва), стоимости растительности (посадочные материал), стоимости блоков, управляющих потоком, стоимости аэрационных структур, стоимости блоков управления, прочих расходов.

Однако пропорции отдельных расходов различны в разных частях мира. Крупные системы демонстрируют меньшую удельную стоимость.

Например, в обзоре чешских исследователей (Vymazal & Kropfelova, 2008) обобщаются имеющиеся данные по сооружениям подповерхностного потока в США, Чехии, Португалии, Испании и Португалии. Согласно этим данным, 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 расходы - 1,8-12%. Стоимость за 1 м<sup>2</sup> меняется от 29 долларов в Индии и 33 доллара в Коста-Рике до 257 евро в Бельгии.

В целом удельные капитальные затраты (к единице гидравлической нагрузки) для ФОС подповерхност-

ного 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, а расходы на техническое обслуживание в несколько раз ниже по сравнению с классическими очистными сооружениями 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 в связи с тем, что посредством этого можно избежать затрат на строительство коллекторной сети и насосных станций. ФОС могут быть построены для отдельных групп застройки без объединения стоков в единое крупное очистное сооружение.

#### **Выводы**

Главные отличия фито-очистных систем от других технологий очистки стоков состоят в следующем:

- биогеохимически совместимы с природными ландшафтами, эстетически привлекательны;
- 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;
- отсутствует необходимость применения реагентов для очистки воды и для обеззараживания;
- низкие эксплуатационные затраты за счет сравнительно незначительного энергопотребления;
- отсутствует необходимость привлечения высококвалифицированного персонала.

**Наталья Щеголькова,**  
доктор биологических наук,  
ведущий научный сотрудник;

**Ксения Рыбка,**  
аспирант.

Лаборатория охраны вод Института водных проблем РАН (г. Москва).

Вериссимо Диас, независимый консультант (Португалия);

**Евгений Криксунов,**  
профессор, член-корреспондент РАН,  
биологический факультет  
МГУ им. М.В. Ломоносова.





**Литература:**

1. 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.
2. Kadlec R.H., Knight R.L. (1996) Treatment Wetlands. First Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida.
3. 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.
4. Kadlec, R.H., Wallace, S.D., (2008). Treatment Wetlands, Second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida. 1000 p.
5. Vymazal, J.; Kropfelova, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008.
6. 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.
7. Верещагина И.Ю., Василевская Н.В. Искусственное биоплато в Арктических широтах // Экология производства. 2004. № 4. С. 18-21.
8. Семенов С.Ю., Шелепова Л.И. Водноболотная очистка сточных вод // Безопасность жизнедеятельности. 2008. № 1. С. 37-38.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Herrera Melian J.A., Martin-Rodriguez A.J., Arana J., Gonzalez-Diaz O., Dona Rodriguez J.M., Perez Pena 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.
13. Vymazal Jan , Kropfelova 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. ONORM B 2505 (1997) Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenklar-anlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb (Subsurface flow constructed wetlands - Application, dimensioning, installation, and operation), Osterreichisches Normungsinstitut: Vienna, Austria.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Younger P.L., Banwart S.A., Hedin R. (2002) Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. Kluwer Academic Publishers: London, United Kingdom.
30. Molle P., Lienard 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.
31. Nielsen S. (2004) Sludge reed bed facilities - operation and problems. Lienard 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.
32. 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.
33. Mphlum T., Stalnacke 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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; Universitat fur Bodenkultur Wien: Vienna, Austria.
37. 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; Universitat fur Bodenkultur: Vienna, Austria, pp. IX/6.
38. Laber J., Haberl R., Shrestha R. (1999) Two stage constructed wetland for treating hospital wastewater in Nepal. Water Science and Technology 40(3): 317-324.
39. Mander U., Teiter S., Lohmus K., Mauring T., Nurk K., Augustin J. (2003) Emission rates of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> 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.
40. 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.
41. 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, 2013 Nantes (France). P. 276-277
42. 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, 2013 Nantes (France). P. 321