Фитоочистка как инновационный метод водоочистки

Р. Брешиани

Ambiente Italia; 20129, Милан, Италия, Via Carlo Poerio, д. 39

АННОТАЦИЯ

Введение: инновационная технология фитоочистки позволяет удалять большой спектр загрязняющих веществ из стоков, при этом минимизируя использование механической аппаратуры и реагентов, а также систем непрерывного автоматического контроля. Это позволяет сэкономить на энергопотреблении и человеческих ресурсах, не снижая эффективности процесса. Цель исследования — анализ и оценка функциональности существующих фитотехнологий, определение условий их применимости.

Материалы и методы: приведены данные, полученные компанией Ambiente Italia и результаты существующих исследований по оценке эффективности различных типов систем фитоочистки согласно следующим показателям качества воды: БПК₅, ХПК, общий азот и фосфор, азот аммонийный, твердые взвешенные частицы, патогенные микроорганизмы. Проанализирована связь данных показателей с физикой процессов, происходящих в резервуаре фитоочистки.

Результаты: описаны пять основных направлений технологических исполнений фитосистем и целесообразность их применения в зависимости от различных факторов. Даны практические рекомендации по выбору конструктивных решений и материалов, а также по расчету каждого конкретного типа процесса фитоочистки.

Выводы: для каждого конкретного технического задания должен быть осуществлен обоснованный выбор технологического исполнения системы фитоочистки. Для третичной очистки небольших расходов сточных вод, а также выбора в пользу максимально простого решения, хорошо зарекомендовала себя технология FWS, тогда как для больших расходов воды и высоких показателей по органической нагрузке подходит технология HF. При этом HF уступает в эффективности технологии VF в части удаления общего и аммонийного азота. Однако VF ограничена условием переменного функционирования (с паузами), тогда как HF работает при постоянных расходах. В то же время VF гарантирует более качественное ингибирование патогенных микроорганизмов и фильтрацию стока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фитоочистка, БПК, ХПК, твердые взвешенные частицы, нитрификация, денитрификация, водные растения, азот, гидроботанический метод водоочистки

Благодарности. Выражаем благодарность С.Е. Масютиной за оказанную помощь при переводе статьи на русский язык.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Брешиани Р. Фитоочистка как инновационный метод водоочистки // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 7. С. 885–900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900

Constructed wetland technology as an innovative water treatment method

Riccardo Bresciani

Ambiente Italia company; 39 Via Carlo Poerio-Street 20129, Milano, Italy

ABSTRACT

Introduction: the innovative technology of constructed wetlands (CW) allows removing a wide range of pollutants from the waste water, while minimizing the use of mechanical equipment and chemical reagents as well as systems of process monitoring. As a result, it permits to save the energy and human resources without declining the efficiency of the process. The purpose of the study is to analyse and evaluate the functionality of existing CW technologies and determine the conditions of their application.

Materials and methods: in the case study, the data obtained by Ambiente Italia and the results of existing studies on the efficiency of the various CW technology types are presented according to the following indicators of water treatment: BOD₅, COD, total nitrogen and total phosphorus, ammonium nitrogen, suspended solids, pathogens. The relationship of these indicators with the physics of the process occurring in the CW basin was analysed.

Results: five main CW technology types and expediency of their application depending on various factors are described. Practical recommendations are given on the choice of structural solutions and materials as well as on the calculation procedure of each specific type of CW technology.

Conclusions: for every specific case it must be made a reasonable choice of CW type. For tertiary treatment of small wastewater flows as well as the choice in favour of the simplest solution, FWS technology is well-proven, while for high water flowrates and high levels of organic loads, the HF technology is suitable. At the same time, HF has inferior efficiency with respect to the VF technology in terms of total and ammonium nitrogen removal. However, VF is limited by the condition

of variable operation (with pauses), whereas HF operates at constant flow rates. At the same time, VF guarantees better inhibition of pathogens and influent filtration.

KEYWORDS: constructed wetlands, BOD, COD, suspended solids, nitrification, denitrification, hydrophytes, nitrogen, hydrobotanical water treatment method

Acknowledgement. The authors express their gratitude to Stefania Masyutina for the help provided in the article translation into Russian.

FOR CITATION: Bresciani R. Constructed wetland technology as an innovative water treatment method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:7:885-900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В распоряжении инженеров на данный момент имеется широкая линейка технологий водоочистки. Однако не всегда представляется возможным использование уже существующих и проверенных методов. К примеру, экономически невыгодно, технически и эксплуатационно сложно и нецелесообразно строить крупные очистные сооружения для маленького поселка или отдельного небольшого производства, или подключать отдаленные населенные пункты к существующим сооружениям водоочистки. При этом требования к качеству воды для сброса предъявляются одинаково ко всем источникам загрязнения. В Европе применяются системы фитоочистки, которые комбинируют в себе функции, выполняемые аэротенками, вторичными отстойниками, песчаными фильтрами, окислительно-восстановительными установками и даже системами дезинфекции. В то же время системы фитоочистки гармонично вписываются в ландшафт территории и не нарушают пейзаж.

Фитоочистка или, по-другому, гидрботанический метод водоочистки — это давно изученная, но недавно вышедшая в широкое применение технология, которая искусственно реконструирует природную самоочищающую способность болотных территорий. Как в естественных условиях, так и в искусственно воссозданных, движущей силой процесса водоочистки являются микроорганизмы, которые потребляют растворенный в воде кислород для разложения органических веществ, загрязняющих воду. Комбинация с высшими водными растениями, такими как болотный тростник типа *Phragmites australis*, позволяет создать более комфортные условия для роста и развития бактериальной флоры, а также удалять из воды тяжелые металлы, так как

они поглощаются корнями растений. Кроме того, движение воды происходит через слой специально подобранного загрузочного материала, что дополнительно обеспечивает ее фильтрацию.

Однако, в отличие от настоящих болот, в системах фитоочистки все процессы проходят быстрее и эффективнее. К тому же спроектированные сооружения фитоочистки обеспечивают более высокую степень контроля, по сравнению с естественными водоемами, позволяя более точно оценивать эффективность проведения процесса на основе знания природы микроорганизмов, типологий высших водных растений и гидравлических параметров, применяемых для очистки сточных вод.

Несмотря на то, что функциональный принцип фитоочистки — имитация условий природного процесса самоочищения, реализация данных условий возможна совершенно различными физико-механическими подходами. Изначально под фитоочисткой подразумевали исключительно самую простую технологию FWS¹ [1], аналогом которой (очень условно) служит советская технология биопрудов. Такой метод применялся в основном для очистки стоков сельского хозяйства для удаления нитратов. В дальнейшем с 90-х г. применение FWS было расширено до третичной очистки сточных вод при реконструкции существующих очистных сооружений. Данное технологическое решение изначально имело ограничение по количеству обслуживаемого населения — не более 2000 человек, что отражалось и в принципах проектирования. Параллельно проводился поиск путей усовершенствования технологии за счет анализа биологических характеристик

¹ ÖNORM B 2505. Subsurface flow constructed wetlands — application, dimensioning, utilization and operation. Österreichisches Normungsinstitut Vienna Austria, 2005.

разных типов высших водных растений для выбора оптимального вида².

Внедрение концепции устойчивого развития дало толчок усовершенствованию технологии фитоочистки до систем горизонтального движения воды HF, целью которых является удаление загрязняющих веществ органического происхождения, и до систем вертикального движения потока VF, цель которых — удаление азотсодержащих загрязняющих веществ совместно с органическими загрязнителями. Кроме того, данные технологии обеспечивают дополнительную фильтрацию и дезинфекцию воды и более устойчивы к отрицательным температурам. В Италии все три технологии FWS, HF и VF получили официальный статус, так как были описаны в Национальных технических руководствах^{3,4} с точки зрения расчета, выбора параметров функционирования, эффективности работы, эксплуатационных расходов, механизма строительства и выбора конструкционных материалов.

С конца 2000-х г. было предложено улучшить технологию, интенсифицировав процесс и увеличив количество обслуживаемого населения до 100 000 человек и выше. Так, было предложено технологическое решение FBA [2], предусматривающее проведение принудительной аэрации резервуара фитоочистки и снабжение бактерий и растений дополнительным кислородом. На данный момент такой метод считается максимально эффективным. Оценка степени насыщения стоков кислородом позволила моделировать эффективность проведения процесса безреагентной очистки промышленных сточных вод. В результате было проведено масштабное исследование по эффективности фитоочистки для различных отраслей промышленности [3].

Начиная с 2010 г. французские ученые приступили к разработке нового гидробиотического метода, объединяющего как водоочистку, так и процесс обезвреживания и обезвреживания осадка активного ила, что дало возможность расширить сегмент применения гидробиотических методов и конвертировать фитоочистку в автономное сооружение, осуществляющее все стадии, что и классические очистные сооружения. Таким образом, была разработана технология тростниковых площадок FRB [4–8].

Возник вопрос об эффективности применения систем фитоочистки в условиях очень холодного климата. В Европе одно из самых крупных сооружений, работающее при холодных климатических условиях, — Орхей в Молдавии. Лидером по количеству сооружений фитоочистки, применяемых для отрицательных температур и, в том числе, для промышленных стоков, является Канада, которая научно опровергает стереотип о неэффективности таких технологий при отрицательных температурах [9].

Результатом развития гидробиотического подхода в пять обособленных технологий стал рост темпов строительства сооружений, состоящих исключительно из композиции различных методов фитоочистки, оформленных в отдельные стадии. Такая фитоочистка получила название мультистадийной и по ней ведутся научные исследования с целью стандартизации некоторых комплексных технологических схем [10–11]. Компания Ambiente Italia также разработала собственные схемы мультистадийной очистки, в том числе для холодного климата, которые изложены в данном исследовании.

Научно-техническое развитие экологически чистых подходов (Natural-based solutions) позволяет с уверенностью заявить, что фитоочистка прошла процесс эволюции от одного из факультативных методов водоочистки до самостоятельного комплексного направления в науке, что позволило включить ее в Справочник наилучших доступных технологий РФ и описать как отдельную дисциплину как в составе учебных пособий, так и в государственных справочниках по проектированию [12–14]. Россия активно перенимает передовой европейский опыт [15], чем обусловлен запуск строительства сооружений фитоочистки в Казани на озере Кабан и в Москве, где в 2018 г. ввели в эксплуатацию 46 небольших сооружений, которые уже положительно зарекомендовали себя по эффективности удаления органических загрязнителей, железа, меди, свинца и цинка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности проведения процесса водоочистки были выбраны стандартные оцениваемые показатели загрязнения воды, такие как БПК₅, ХПК, азот и фосфор общий, азот аммонийный, твердые взвешенные вещества и общие колиформные микроорганизмы. На территории Италии такой анализ выполнялся аттестованными лабораториями и надзорными органами ISPRA путем забора проб на входе и выходе из резервуара фитоочистки (в случае единичного сооружения определенного типа) или на входе и выходе из группы сооружений фитоочистки (в случае наличия нескольких

² IWA. Constructed wetlands for pollution control — processes, performance, design and operation. Scientific and Technical. Report No. 8. London : IWA Publishing, 2001.

³ APAT-ARPAT. Linee Guida per la progettazione e gestione di zone umide artificiali per la depurazione dei reflui civili. 2005. Pp. 22–45.

⁴ ISPRA. Guida tecnica per la progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane. 2012. Pp. 13–50.

последовательных резервуаров в технологической линии). Процедура забора и хранения проб воды, а также проведение лабораторных испытаний выполняются согласно утвержденному справочнику методик анализа воды «Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater» [16] и методическому указанию итальянского Агенства по защите окружающей среды⁵. Данные по средней эффективности очистки технологий VF, HF и FWS были получены из документов, разработанных по итогам аналитической деятельности ISPRA, в то время как эффективность работы очистных сооружений, реализованных группой компаний Ambiente Italia и приведенных в качестве примера в статье, анализировалась испытательными лабораториями самих сооружений в соответствии с вышеуказанными нормативными документами.

При проектировании систем фитоочистки соблюдались требования, изложенные в Техническом руководстве ISPRA [3] и нормы предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в очищенном стоке согласно национальному документу D. Lgs 152/06 (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механизмы, происходящие в резервуаре фитоочистки разделяются на 3 группы:

- Физические:
 - фильтрация через слои загрузочного материала-наполнителя и корневую систему высших водных растений;
 - седиментация твердых взвешенных и коллоидных частиц.

⁵ Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi Tecnici APAT and Istituto di ricerca sulle acque-Consiglio nazionale delle ricerche IRSA-CNR. Metodi analitici per le acque, Manuale e Linee Guida. Roma, 2003. Pp. 161–781.

- Химические:
 - выпадение в осадок нерастворимых соединений из водной фазы или совместное осаждение других соединений вместе с ними (азотистые и фосфорные соединения);
 - адсорбция слоем загрузки (в зависимости от его характеристик) и самими растениями (азот, фосфор, металлы);
 - разложение под действием УФ-спектра солнечных лучей (вирусы), под действием процесса окисления и восстановления (металлы).
- Биологические:
 - развитие бактерий свободноплавающих или фиксированных (прикрепленных к поверхности резервуара/загрузки/растений), что приводит к биологическим механизмам, таким как деградация органического вещества, нитрификация в аэробных зонах и денитрификация в анаэробных зонах резервуара фитоочистки;
 - развитие свободноплавающих фиксированных водорослей (фитопланктон), что приводит к эффектам фотосинтеза и, следовательно, производству кислорода, необходимого для аэробных бактерий, и способствует удержанию части питательных веществ (эффект «Лагунаж»).

Наибольший вклад в процесс фитоочистки вносят механизмы фильтрации (удержание загрузкой твердых взвешенных частиц и части органических загрязняющих веществ (ХПК) и окисления за счет аэробных бактерий (ХПК растворенный, органический и аммонийный азот). Более подробное описание механизмов, происходящих в системе фитоочистки представлено в табл. 2.

Роль водных растений в процессе фитоочистки

В процессе фитоочистки немаловажную роль играют высшие водные растения, чьими функциями являются: фильтрация воды корнями, а также

Табл. 1. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в воде, подлежащей сбросу в открытый водоем в Италии

Table 1. Italian maximum permissible concentrations of the water pollutants to be discharged into an open water body

Показатель / Indicator	мг/л
БПК5 / BOD5	25
ХПК / COD	125
Твердые взвешенные частицы / SST	35
Азот аммонийный / Ammonium nitrogen	15
Нитрат-ион / Nitrate ion	20
Общий азот / Total nitrogen	15 * для охраняемых территорий, 50 для остальных / 15 * for protected territories, 50 — for the rest
Общий фосфор / Total phosphorus	2

Табл. 2. Механизмы, происходящие при фитоочистке

Table 2. Mechanisms occurring during CW treatment

Показатель / Indicator	Механизм действия в рамках процесса / Mechanism of action within the process
БПК5 / BOD5	Седиментация, УФ-дезинфекция за счет солнечных лучей, бактериальная деградация / Sedimentation, UV disinfection by sunlight, bacterial degradation
ХПК / COD	Седиментация, УФ-дезинфекция за счет солнечных лучей, бактериальная деградация / Sedimentation, UV disinfection by sunlight, bacterial degradation
Твердые взвешенные частицы / SST	Седиментация, фильтрация, бактериальная деградация / Sedimentation, filtration and bacterial degradation
Металлы (мышьяк, кадмий, медь, хром, ртуть, никель, свинец, цинк, селен) / Metals (arsenic, cadmium, copper, chromium, mercury, nickel, lead, zinc, selenium)	Седиментация и выпадение в осадок из жидкой фазы, адсорбция, ионный обмен, поглощение корнями водных растений, окислительно-восстановительные процессы / Sedimentation and precipitation from liquid phase, adsorption, ion exchange, absorption by hydrophyte roots, oxidation and reduction processes
Азот / Nitrogen	Седиментация, адсорбция, улетучивание (аммонийный азот), бактериальная деградация (денитрификация), поглощение корнями водных растений и бактериальной флорой / Sedimentation, adsorption, volatilization (ammonium nitrogen), bacterial degradation (denitrification), uptake by hydrophyte roots and bacterial flora
Фосфор / Phosphorus	Седиментация и выпадение в осадок из жидкой фазы, адсорбция, поглощение бактериальной флорой и корнями водных растений / Sedimentation and precipitation from liquid phase, adsorption, uptake by bacterial flora and hydrophyte roots
Патогенные микроорганизмы / Pathogens	Седиментация и фильтрация, антибиотический эффект со стороны водных растений / Sedimentation and filtration, antibiotic effect from hydrophytes
Нефтепродукты / Petroleum products	Улетучивание, УФ-дезинфекция за счет солнечных лучей, бактериальная деградация, поглощение корнями водных растений / Volatilization, UV disinfection by sunlight, bacterial degradation, uptake by hydrophyte roots
Синтезированные углеводороды (растворители, пестициды, инсектициды, полициклические ароматические углеводороды, хлористые соединения) / Synthesized hydrocarbons (solvents, pesticides, insecticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, chloride compounds)	Седиментация, улетучивание, адсорбция, УФ-дезинфекция за счет солнечных лучей, бактериальная деградация, поглощение корнями водных растений / Sedimentation, volatilization, adsorption, UV disinfection by sunlight, bacterial degradation, uptake by hydrophyte roots
Патогенные микроорганизмы / Pathogens	Седиментация, УФ-дезинфекция за счет солнечных лучей, поглощение другими микроорганизмами, естественная смерть, смерть за счет антибиотиков, выделяемых корнями растений / Sedimentation, UV disinfection by sunlight, absorption by other microorganisms, natural death, death by antibiotics secreted by plant roots

развитие на поверхности корней бактериальной флоры, способствующей разложению органических загрязнителей; транспорт кислорода в воду и формирование аэробных зон в анаэробной воде, что проиллюстрировано на рис. 1. Некоторые исследования по растениям *Phragmites australis* определяют кислородный транспорт в интервале от 0,02 до 45 г/м²/сут.

Одновременное присутствие аэробных, анаэробных и аноксических состояний в воде имеет решающее значение для развития различных семейств микроорганизмов, обеспечивающих окисление ор-

ганического вещества, нитрификацию, денитрификацию азота. Вклад растений в водоочистку также выражается путем всасывания через корневую систему азота, фосфора и других микроэлементов. Кроме того, вокруг корней образуются небольшие, но эффективные экосистемы, способные устранять патогенные микроорганизмы.

Структура водоемов фитоочистки и их классификация

Принципиальные схемы фитоочистки разделяются на следующие категории в соответствии с ти-

Рис. 1. Схема передачи кислорода вглубь воды благодаря корневой системе высших водных растений

Fig. 1. Scheme of oxygen transmission into water depth due to root system of higher hydrophytes

пом подачи и движения сточных вод в резервуаре и типом высших водных растений:

1. FWS

Одна из классических технологий фитоочистки (рис. 2).

Описание: система свободного (поверхностного) потока воды имитирует природные болота и характеризуется резервуарами малой глубины и большой поверхностью контакта с атмосферным воздухом. Данная схема используется в качестве третичной стадии очистки после основной схемы.

Параметры выбора данной системы: третичная стадия очистки, следующая после основных узлов, позволяет улучшить качество стока на выходе с точки зрения удаления азота и фосфора, а также патогенных микроорганизмов.

Тип водных растений: полуводные растения гелофиты или погружные растения ризофиты (погружные гидрофиты).

2. SFS-h или HF

Одна из классических технологий фитоочистки (рис. 3).

Описание: система горизонтального потока внутри слоя загрузочного материала при постоянной степени насыщения. Системы HF могут состоять из нескольких линий выполненных параллельно с целью облегчения операций по техническому обслуживанию.

Параметры выбора данной системы: малое или среднее количество обслуживаемого населения. Максимальная эффективность очистки от органической нагрузки, твердых взвешенных частиц, бакте-

Рис. 2. Система FWS

Fig. 2. FWS technology

Рис. 3. Система HF

Fig. 3. HF technology

риальной нагрузки. Менее эффективна для больших концентраций восстановленных форм соединений азота (т.е. не требуется сильное удаление фракций азота посредством окисления). Экономия электроэнергии.

Тип водных растений: полуводные укоренившиеся макрофиты, в основном *Phragmites australis* и *Typha latifolia*.

3. SFS-v или VF

Одна из классических технологий фитоочистки (рис. 4).

Описание: система вертикального потока внутри слоя загрузочного материала при переменной степени насыщения. Системы VF могут состоять из нескольких линий выполненных параллельно с целью облегчения операций по техническому обслуживанию. Система VF функционирует на переменной подаче расхода, но благодаря нескольким линиям и их режимам включения и выключения возможно обеспечить непрерывную работу системы в целом.

Рис. 4. Система VF

Fig. 4. VF technology

Параметры выбора данной системы: максимальная эффективность от очистки аммонийного азота, органической нагрузки, твердых взвешенных частиц, от сложных химических веществ, когда биологические процессы системы HF замедляются. Экономия электроэнергии.

Тип водных растений: полуводные укоренившиеся макрофиты (*Scirpus* sp., *Eleocharis* sp., *Cyperus* sp., *Juncus* sp., *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, *Glyceria maxima*, *Typha* sp.).

4. FRB

Инновационная технология (рис. 5).

Описание: французская система тростниковых площадок для обработки сточных вод с большим количеством взвешенных частиц и удаления влаги из осадков водоочистки (шлама септиков, отработанного активного ила аэробных и анаэробных реакторов). Обычно предшествует площадкам сушки осадка. Жидкий шлам последовательно загружается насосом на площадки поверхности резервуара посредством распределительных трубопроводов и поверх обезвоженного осадка, оставшегося от предыдущего процесса. Далее происходит его обработка путем комбинации физических и биохимических процессов. Со временем в тростниковых бассейнах происходит уменьшение осадка. За счет обезвоживания (дренаж и испарение) масса твердых веществ осадка остается на поверхности резервуара в виде остаточного шлама, в то время как большая часть воды уходит вертикально через фильтрующий слой. Корка твердых взвешенных частиц растет со скоростью 1–2 см в год. Рабочий цикл накопления осадка — приблизительно 10 лет. После 10 лет эксплуатации осадок достигает высоты примерно 1,2–1,5 м с содержанием сухих веществ 30–40 %. В процессе очистки блокируются неприятные запахи, так как поверхностная корка шлама поддерживается

Рис. 5. Структура резервуара FRB

Fig. 5. FRB basin structure

в аэробных условиях как благодаря способу подачи воды, так и благодаря растениям.

Резервуар такой фитоочистки схож по конструкции с системой VF.

Параметры выбора данной системы: отсутствие возможности проведения предварительного осаждения твердых взвешенных частиц и возможности обезвреживания отработанного шлама, низкий бюджет, заложенный на реализацию, ограничения в площади для постройки сооружений. Экономия электроэнергии.

Тип водных растений: в основном тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) или болотный камыш.

5. FBA

Инновационная технология (рис. 6).

Описание: технология, введенная в 2009 г. Скоттом Д. Уоллесом, представляет собой резервуары с распределительной линией принудительной аэрации на дне конструкции, что обеспечивает повышение эффективности деградации органической фракции и аммонийного азота и позволяет использовать технологию для промышленных стоков и обработки шлама. Резервуары могут быть выполнены по схеме VF и HF.

Параметры выбора данной системы: промышленные стоки с большим содержанием БПК, аммонийного азота и органических взвешенных частиц. Жесткие требования, предъявляемые к эффективности удаления загрязняющих веществ. Требования к стабильной производительности системы. Условия ограниченного территориального пространства (экономия площади в 1–5 раз т.е. 1,5–3 м²/экв.житель). Экономия электроэнергии по сравнению с использованием аэротенков.

Рис. 6. Схема аэрационной фитоочистки

Fig. 6. FBA technology

Эффективность работы различных технологий фитоочистки

Системы FWS применяются в основном как метод доочистки и их эффективность сильно варьируется в зависимости от состава сточных вод и погодных условий. Обычно, в самом простом виде,

возможно встретить независимые сооружения фитоочистки, реализованные по схеме FRB, HF или VF, чьи показатели эффективности более стабильны. Компания Ambiente Italia собрала и усреднила данные по эффективности функционирования исключительно одной стадии указанного типа сооружений фитоочистки в Италии по основным показателям качества воды (табл. 3). При добавлении второй стадии эффективность очистки соответственно повышается.

Мультистадийная (гибридная) фитоочистка

В том случае, когда один тип системы фитоочистки не удовлетворяет поставленным нормативам удаления загрязняющих веществ, для повышения эффективности сооружений возможно применить сразу несколько фитотехнологий на разных стадиях процесса. Сложность такой мультистадийной схемы существенно зависит от требований к стоку на выходе, предъявляемых конечным потребителем, а также от морфологии самой территории сооружений, метеоклиматических условий района и от типологии самого стока. Так, например совмещение систем HF и VF позволяет уменьшить занимаемую площадь сооружений до 2–3 м²/экв.жителей и улучшить эффективность очистки в основном по общему азоту благодаря процессам нитрификации в резервуаре VF и денитрификации в резервуаре HF.

Если для коммунальных стоков небольшого поселка или земельного участка достаточно провести предочистку в отстойниках Imhoff и основную очистку в системах фитоочистки HF и VF, то для коммунальных сточных вод населенного пункта с населением свыше 200 человек в случае смешанной канализации необходимо предусмотреть следующие узлы:

- предварительная обработка воды на решетках с большим прозором для удаления крупных фракций мусора таких как ветки, или банки, накопительные дренажные колодцы для перепуска/накопления дождевых вод (максимальный расход таких вод для подачи на очистные сооружения зависит от регионального законодательства по дождевым стокам). Предварительная обработка воды не требуется в случае раздельной канализации;
- обработка на решетках с малым прозором или шнековых фильтрах для удаления частиц размерами менее 1,5–2 мм в зависимости от размера прозора;
- первичное осаждение в трехкамерном отстойнике или в отстойнике Imhoff для более крупных сооружений. Эта стадия может быть пропущена в случае использования французских систем FRB;
- система вторичной фитоочистки, предпочтительно, гибридная, выполненная таким образом, чтобы уменьшить габаритные размеры системы.

Табл. 3. Эффективность технологии фитоочистки

Table 3. The efficiency of different CW technology types

Показатель Indicator	Эффективность систем HF, % HF efficiency, %	Эффективность систем VF, % VF efficiency, %	Эффективность систем FRB, % FRB efficiency, %	Эффективность систем FWS, % FWS efficiency, %
БПК5 / BOD5	85–95	85–95	До / Up to 99	34–94 в среднем / 69 on average
ХПК / COD	От / From 60	От / From 70	80–92	9–88 в среднем / 59 on average
Взвешенные частицы / Suspended solids	70–95	80–95	До / Up to 96	11–95 в среднем / 60 on average
Азот аммонийный / Ammonium nitrogen	50–70	80–90	До / Up to 95	32–54 в среднем / 51 on average
Общий азот / Total nitrogen	55–75	55–75	50–90	14–66 в среднем / 44 on average
Общий фосфор / Total phosphorus	50–90	50–90	До / Up to 98	17–86 в среднем / 44 on average
Патогенные микроорганизмы Pathogen	97–99	2–3 log	—	До / Up to 99

Рис. 7. Пример мультистадийной схемы для муниципалитета Dicomano, рассчитанной на 3500 человек

Fig. 7. An example of a multistage technology for the municipality of Dicomano designed for 3,500 PE

Пример технологической схемы гибридной фитоочистки представлен на рис. 7, а эффективность работы таких сооружений — на рис. 8.

Другим примером является типовая мультистадийная схема сооружений FRB, которая предусматривает три параллельные линии для первой стадии очистки необработанных поступающих

сточных вод — когда одна линия питается непрерывно в течение 3,5 дней, на две другие не подается сток, так как они должны находиться в покое 4–8 дней для лучшей минерализации органической фракции. На второй стадии вода поступает на две линии в резервуары VF переменнo каждые 2–4 часа. Вторая стадия может предусматривать систему HF

Рис. 8. Эффективность работы очистных сооружений Dicomano

Fig. 8. Efficiency of Dicomano CW treatment plant

Рис. 9. Блок-схема сооружений FRB для муниципалитета Castelluccio di Norcia (1000 обслуживаемых жителей)

Fig. 9. Block diagram of FRB plant for the municipality of Castelluccio di Norcia (1000 inhabitants served)

Табл. 4. Эффективность работы сооружений Castelluccio di Norcia

Table 4. Efficiency of Castelluccio di Norcia plant

Показатель / Indicator	Средняя эффективность водоочистки, % / Average efficiency of water treatment, %
Твердые взвешенные частицы / Suspended solid particles	95
ХПК / COD	99
БПК5 / BOD5	98
Общий азот / Total nitrogen	80
N-NH ₄ / Ammonium nitrogen	99
Общий фосфор / Total phosphorus	94

или другую, в зависимости от целей самой очистки. Одни из примеров таких сооружений — очистные сооружения Castelluccio di Norcia (рис. 9).

Средняя эффективность данных сооружений по некоторым параметрам представлена в табл. 4.

Пример многостадийной очистки в холодном климате

В 2013 г. в Молдавии были запущены в эксплуатацию сооружения фитоочистки Орхей (Orhei) (рис. 10), рассчитанные на успешное функциониро-

Рис. 10. Технологическая схема сооружений Орхей

Fig. 10. Flow chart of Orhei plant

Табл. 5. Средние показатели эффективности водоочистки сооружений Орхей

Table 5. Average performance of water treatment plant of Orhei

Показатель / Indicator	Средняя эффективность водоочистки, % / Average efficiency of water treatment, %	Концентрация на выходе, мг/л / Output concentration, mg/l
БПК5 / BOD5	85	17
ХПК / COD	73	61
Взвешенные частицы / Suspended solids	96	21
Азот аммонийный / Ammonium nitrogen	53	18
Нитрат-ион / Nitrate ion	—	2
Общий азот / Total nitrogen	48	20
Общий фосфор / Total phosphorus	56	1

вание при отрицательных температурах до -35°C . Проектный расход воды — $1500\text{ м}^3/\text{сут}$ и количество обслуживаемого населения 30 000 жителей. С ноября 2013 по февраль 2014 г., т.е. в самый холодный период года, проводился мониторинг эффективности работы сооружений (результаты представлены в табл. 5).

В данном анализе отсутствует вклад в процесс очистки со стороны высших водных растений вида *Phragmites australis*, так как на момент исследований сооружения только приступили к работе и к зимнему периоду водная флора не успела окончательно развиваться. В ходе испытания было выявлено, что технология VF вносит большой вклад в процесс ни-

трификации в зимний период по сравнению с FRB (на 15 %), при этом денитрификация проходит с одинаковой интенсивностью в резервуарах обеих технологий. Полученные результаты показали высокую эффективность проведения процесса в зимний период времени, когда наиболее сложно достигать установленных параметров работы любых очистных сооружений. Таким образом, показатели очищенного стока соответствуют нормам ЕС.

Проектный расчет. Некоторые рекомендации

Как уже упоминалось, резервуары фитоочистки заполняются специально подобранным загрузочным материалом в один и более слоев, который позволяет закрепиться корням высших водных растений, обеспечивает рост бактериальной флоры и гарантирует фильтрацию стока от взвесей. Характеристики материала, применяемого для фитосистем, приведены в табл. 6.

Система HF

Расчет: условно принимается, что такая система функционирует по принципу реактора plug-flow с прикрепленной активной биомассой. Применяемые подходы к измерению системы Kadlec & Knight (1996), Метод Reed, Crites & Middlebrooks (1995) и метод USEPA — Environment Protection Agency (1993, 1999).

Геометрия резервуаров: форма горизонтальных резервуаров должна быть строго прямоугольной, наклон днища может варьироваться 1 до 5 %.

Минимальная площадь поперечного сечения:

$$A_t = \frac{Q_s}{K_f \cdot \frac{dh}{ds}}, \quad (1)$$

где A_t — площадь поперечной секции, м²; Q_s — средний расход сточной воды, м³/с; K_f — гидравлическая проводимость загрузочного материала резервуара, м/с; dh , ds — наклон днища резервуара, м/м; h — глубина резервуара, м; s — длина резервуара, м.

Такая площадь согласно USEPA должна гарантировать не превышение норм по БПК₅ = 0,2 кг/м² · сут (по органической нагрузке на единицу площади поперечного сечения) с целью предотвращения за-

сорения загрузки во входной части резервуара фитоочистки.

Геометрия резервуара: глубина в основном зависит от типа выбранных растений, т.е. от глубины развития корневой системы. На основе площади поперечного сечения и глубины развития корневой системы растений можно установить эффективные значения ширины и глубины бассейна фитоочистки.

Соотношение длина/ширина (L/W) должно быть предусмотрено в интервале от 0,5 до 3, принимая во внимание, что ширина резервуара должна обеспечивать равномерное распределение потока на всей входной секции, совместимой с выбранной системой подачи воды. При слишком больших значениях ширины рекомендуется разделить поток на несколько линий. Площадь поверхности не должна быть слишком большой, чтобы избежать чрезвычайно малой глубины резервуара на входной секции, а также чтобы обеспечить связь глубины секции на выходе с максимальным возможным значением глубины роста корневой системы растений. Однако длина должна быть не менее 4 м.

Загрузочный материал резервуара: необходимо гарантировать гидравлическую проводимость на уровне 100 м/сут. Может использоваться слой как из одного материала, так и многослойная загрузка. Структура используемого загрузочного материала в основном соответствует следующим параметрам: 1-й слой гравия 1–16 мм, 2-й слой щебня 80–120 мм шириной до 1 м. Гранулометрия каждого выбранного материала может быть смешанной в продольном направлении в установленных пределах, при этом гранулометрия должна быть одинакова в вертикальном разрезе для устранения формирования движения отдельных преимущественных потоков движения воды (и следовательно сокращения времени контакта воды).

Система VF

Расчет: расчет такой системы выполняется в соответствии с потреблением кислорода, необходимого для окисления БПК₅ и иона аммония. Принимая во внимание коэффициент аэрации 30 гр О₂/м² поверхности, возможно произвести расчет по-

Табл. 6. Загрузочный материал резервуаров фитоочистки

Table 6. Filling material of CW basins

Тип / Type	Размер зерна, мм / Fraction dimension, mm	Пористость загрузки, % / Filling porosity, %	Гидравлическая проводимость K_s , м/день / Hydraulic conductivity K_s , m/day
Песок / Sand	1–2	30–32	420–480
Гравий / Gravel	8–16	35–38	500–800
Щебень / Rubble	32–128	40–45	1200–1500

верхности системы + 25 % в качестве фактора безопасного функционирования.

Кислород, необходимый для окисления БПК₅, равен 1 кг O₂/кг БПК₅ и для окисления аммонийной фракции — 4,3 кг O₂/кг NH₄, которые выведены для уравнения нитрификации:

Исходя из этих данных, проводится расчет площади поверхности резервуара по уравнению:

$$A_s = 1,25 \cdot \frac{OD}{k_a}, \quad (2)$$

где OD — потребление кислорода на процесс; K_a — коэффициент поверхностной аэрации.

Расчет OD проводится по методике С. Platzer (2000 г.), учитывая следующие факторы:

- удаление 85 % ХПК;
- потребление кислорода 0,7 гр O₂/гр ХПК;
- потребление кислорода на нитрификацию 4,3 гр O₂/гр ТKN;
- восстановление кислорода при денитрификации 2,9 гр O₂/гр NO₃ (10 %);
- в немецком руководстве [5] максимальное рекомендованное значение органической нагрузки (по ХПК) 50 гр/м²/сут.

Геометрия резервуара: нет ограничений по выбору формы, важно обеспечить равномерное распределение сточных вод по всей поверхности и желательно симметричную форму.

Загрузочный материал резервуара: используются разные схемы: в английских системах — слой гравия 8–16 мм, в то время как на немецких сооружениях применяется чистый речной песок размером 0–3 мм. Также как и в горизонтальной схеме могут

использоваться как один слой загрузочного материала, так и более разной гранулометрии. Обычно на поверхность выкладывают гравий слоем с минимальной толщиной 10 см, на дно возможна укладка более крупного гравия слоем 15 см и размером частиц 25–50 мм.

Если выбирается однородный песок, то желательно кремнистый (в качестве альтернативы можно использовать кварцевый, гранитный или известняковый), гомогенного размера частиц.

Система FWS

Расчет: максимально имитируя природные системы, они тем самым слабо стандартизированы и уникальны в каждом конкретном случае. Расчет проводится междисциплинарными подходами, которые описали в своих работах исследователи: Vismara (2000), Borin e Marchetti (1997), Crites, 1994.

В целом в расчете должны быть приняты во внимание следующие параметры (см. табл. 7).

Геометрия резервуара: геометрия и формы резервуаров представлены большим разнообразием, так как целью данного метода фитоочистки является реконструкция природного водоема с прогрессивным развитием биоразнообразия. На выбор формы резервуара также влияет морфология грунта, наличие риска продольной или поперечной эрозии, и гидравлические параметры системы, а также ее эффективность.

Один из самых важных параметров системы — отношение длины к ширине влажной зоны резервуара, который обозначается термином Aspect Ratio (AR). Интервал значений AR варьируется от 1 до 90, где рекомендуемые значения 4:1 и 10:1. Обычно системы FWS содержат серию резервуаров для предотвращения гидравлического короткого замыкания

Табл. 7. Параметры проектирования системы FWS

Table 7. The design parameters of the FWS system

Проектный параметр / Design parameter	Единица измерения / Measuring units	Величина / Value
Гидравлическое время контакта / Hydraulic contact time	Сут / days	5–14
Максимальное значение БПК ₅ / Maximun BOD ₅	кг/житель/день / kg/inhabitant/day	80
Глубина воды / Water depth	м / m	0,15–0,8
Поверхность резервуара / Basin surface	м ² /экв.житель / m ² /PE	4–40 (менее 20 для вторичной стадии) / (less than 20 for secondary phase)
Длина/ширина резервуара / Basin length/width	—	2:1–10:1
Свободное зеркало воды/зона посадок / Water table/planting zone	%	40–60

и повышения эффективности очистки. Угол наклона поверхности резервуара 0,3 и 2 % (по продольной стороне).

Загрузочный материал резервуара: на непрогниваемое дно резервуара выкладывают слой почвы высотой 20–40 см с большим содержанием глины или песчано-известковые почвы с большим содержанием органических компонентов, цель — помощь в укоренении растений и механическая защита гидроизоляции. Материалы для последующих (верхних) слоев такие же как в системах НФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, мы можем с уверенностью сказать, что вышеописанная технология может выступать не только в качестве альтернативного решения очистным сооружениям, но и должна рассматриваться как наилучшее решение с точки зрения экологической безопасности, так как не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

С точки зрения энергоэффективности, данная технология демонстрирует минимальное потребление электроэнергии для реализации своих процессов.

Кроме того, рассматриваемую технологию применяют при реконструкции уже существующих очистных сооружений с точки зрения повышения эффективности удаления загрязняющих веществ, добавляя ее в качестве третичной стадии очистки сточных вод.

Вкратце некоторыми преимуществами фитоочистки являются:

- простота функционирования и обслуживания благодаря отсутствию движущихся механических

деталей и неустойчивых процессов, требующих постоянного контроля;

- широкий спектр применения для различных типов сточных вод;
- безопасность;
- отсутствие необходимости использования реагентов;

- высокая эффективность процесса очистки в зависимости от предъявляемых требований;

- небольшая занимаемая площадь и возможность вписать сооружения в территориальный ансамбль, не нарушив гармонию и красоту пейзажа;

- невысокая стоимость реализации и эксплуатации, что позволяет выполнять такие сооружения в труднодоступных районах и для небольших по размерам поселений, и не только;

- стоимость технического обслуживания сооружений фитоочистки составляет всего лишь одну треть от стоимости технического обслуживания стандартных очистных сооружений;

- эксплуатация данного сооружения продемонстрировала высокую эффективность очистки воды так же и при низких температурах (–25 °С) в разных странах, таких как, Канада, Китай, Швеция, США;

- в случае сильных ограничений по лимитам сброса параметров, зависящих от температуры, возможно предусмотреть гибкие решения, которые зависят от конкретной ситуации:

- рекуперация тепла в случае совместного производства;

- повторное использование сточных вод для производства биомассы, преобразуя загрязняющие вещества (азот) в сырье, в рамках циркулярной экономики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vymazal J., Kröpfelová L. Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow // *Environmental Pollution*. 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-8580-2
2. Kadlec R.H., Wallace S.D. Treatment wetlands. Lewis, Boca Raton, 2008. P. 133. DOI: 10.1201/9781420012514
3. Wang M., Zhang D., Dong J., Tan S.K. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review // *Hydrobiologia*. 2017. Vol. 805. Issue 1. Pp. 1–31. DOI: 10.1007/s10750-017-3315-z
4. Molle P. French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer // *Water Science and Technology*. 2014. Vol. 69. Issue 1. Pp. 106–112. DOI: 10.2166/wst.2013.561
5. Millot Y., Troesch S., Esser D., Molle P., Morvannou A., Gourdon R. et al. Effects of design and operational parameters on ammonium removal by single-stage French vertical flow filters treating raw domestic wastewater // *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 97. Pp. 516–523. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.002
6. Paing J., Guilbert A., Gagnon V., Chazarenc F. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems // *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 80. Pp. 46–52. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.029

7. Morvannou A., Forquet N., Michel S., Troesch S., Molle P. Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years // *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 71. Issue 9. Pp. 1333–1339. DOI: 10.2166/wst.2015.089

8. Rizzo A., Bresciani R., Martinuzzi N., Masi F. French reed bed as a solution to minimize the operational and maintenance costs of wastewater treatment from a small settlement: an Italian example // *Water*. 2018. Vol. 10. Issue 2. P. 156. DOI: 10.3390/w10020156

9. Wang M., Zhang D.Q., Dong J.W., Tan S.K. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review // *Journal of Environmental Sciences*. 2017. Vol. 57. Pp. 293–311. DOI: 10.1016/j.jes.2016.12.019

10. Zanieri L., Bracali M., Bresciani R., Masi F. Multi-stage CW systems for winery wastewater treatment, submitted to WP&T, March 2011, Atti della «12th IWA Specialized Group Conference on «Wetland Systems for Water Pollution Control», 4–8 Ottobre 2010, Venezia, Italia.

11. Masi F. Enhanced denitrification by a hybrid HF-FWS constructed wetland in a large-scale wastewater treatment plant // *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*. 2008. Pp. 267–275. DOI: 10.1007/978-1-4020-8235-1_23

12. Metcalf & Eddy Inc. Wastewater engineering: treatment and resource recovery // McGraw-Hill Education. 5 ed. 2017. Pp. 551–673.

13. Luigi M. Depurazione delle acque. Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto // Edagricole-New Business Media. 2012. Pp. 276–334.

14. Bresciani R., Masi F. Manuale pratico di fitodepurazione // Terra Nuova Edizioni. 2012. Pp. 60–150.

15. Конте Д. Фитоочистка: Инновационная техника очистки загрязненной воды // *Справочник Эколога*. 2019. № 5 (77).

16. Rice E.W., Baird R.B., Eaton A.D. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Water Works Association: Water Environment Federation, 2017. Pp. 2–66.

Поступила в редакцию 5 марта 2019 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 24 июня 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: **Рикардо Брешиани** — инженер по водоочистке; **Ambiente Italia**; 20129, г. Милан, Италия, Via Carlo Poerio, д. 39; info@ambienteitalia.it.

REFERENCES

1. Vymazal J., Kröpfelová L. Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. *Environmental Pollution*. 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-8580-2

2. Kadlec R.H., Wallace S.D. *Treatment wetlands*. Lewis, Boca Raton, 2008; 133. DOI: 10.1201/9781420012514

3. Wang M., Zhang D., Dong J., Tan S.K. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review. *Hydrobiologia*. 2017; 805(1):1-31. DOI: 10.1007/s10750-017-3315-z

4. Molle P. French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer. *Water Science and Technology*. 2014; 69(1):106-112. DOI: 10.2166/wst.2013.561

5. Millot Y., Troesch S., Esser D., Molle P., Morvannou A., Gourdon R. et al. Effects of design and operational parameters on ammonium removal by single-stage French vertical flow filters treating raw domestic wastewater. *Ecological Engineering*. 2016; 97:516-523. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.002

6. Paing J., Guilbert A., Gagnon V., Chazarenc F. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: A survey based on 169 full scale systems. *Ecological Engineering*. 2015; 80:46-52. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.029

7. Morvannou A., Forquet N., Michel S., Troesch S., Molle P. Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years. *Water Science and Technology*. 2015; 71(9):1333-1339. DOI: 10.2166/wst.2015.089

8. Rizzo A., Bresciani R., Martinuzzi N., Masi F. French reed bed as a solution to minimize the operational and maintenance costs of wastewater treatment from a small settlement: an Italian example. *Water*. 2018; 10(2):156. DOI: 10.3390/w10020156

9. Wang M., Zhang D.Q., Dong J.W., Tan S.K. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. *Journal of Environmental Sciences*. 2017; 57:293-311. DOI: 10.1016/j.jes.2016.12.019

10. Zanieri L., Bracali M., Bresciani R., Masi F. Multi-stage CW systems for winery wastewater treat-

ment. *Atti della "12th IWA Specialized Group Conference on 'Wetland Systems for Water Pollution Control'"*, 4–8 Ottobre 2010, Venezia, Italia.

11. Masi F. *Enhanced denitrification by a Hybrid HF-FWS constructed wetland in a large-scale wastewater treatment plant. Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands*. 2008; 267-275. DOI: 10.1007/978-1-4020-8235-1_23

12. Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. McGraw-Hill Education. 5 ed. 2017; 551-673.

13. Luigi M. *Depurazione delle acque. Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto*. Edagricole-New Business Media, 2012; 276-334.

14. Bresciani R., Masi F. *Manuale pratico di fitodepurazione*. Terra Nuova Edizioni. 2012; 60-150.

15. Conte G. *Constructed wetlands: Innovative technology of water treatment*. *Environmental guide*. 2019; 5(77). (rus.).

16. Rice E.W., Baird R.B., Eaton A.D. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017; 2-66.

Received March 5, 2019

Adopted in a modified form on April 15, 2019

Approved for publication June 24, 2019

BIONOTES: **Riccardo Bresciani** — Engineer; **Ambiente Italia**; 39 Via Carlo Poerio-Street, Milano, 20129, Italy; info@ambienteitalia.it.