

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 628.35

**Е.Е. Сивкова, С.Ю. Семёнов**

*Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «CONSTRUCTED WETLANDS» ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И ПРЕДПРИЯТИЙ**

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П143 от 14 апреля 2010 г.).

*Рассматривается одна из перспективных технологий очистки сточных вод – «constructed wetlands». Приведена историческая справка о возникновении и изучении данного метода; описано принципиальное строение систем «constructed wetlands»; сделан обзор современных научных публикаций, направленных на изучение разных аспектов функционирования, возможностей повышения эффективности и качества очистки сточных вод с помощью рассматриваемой технологии. Установлено, что технология «constructed wetlands» в ряде случаев является хорошей альтернативой интенсивным методам обезвреживания сточных вод ввиду отсутствия ограничений применения, а дальнейшие исследования этого метода позволят расширить область его распространения и сферы возможного приложения.*

**Ключевые слова:** «constructed wetlands»; сточные воды; эффективность очистки.

Технологии интенсивной очистки сточных вод в применении к малобетным источникам постепенно теряют свою популярность вследствие значительных капитальных и эксплуатационных затрат, климатических ограничений использования, а также сложности в обслуживании. Поэтому в последние годы в мире активно стимулируются развитие и использование альтернативных, мелкомасштабных, экологически и экономически приемлемых технологий очистки сточных вод. Наиболее перспективными из них можно назвать те, действие которых основано на использовании естественных процессов, происходящих в водных экосистемах при участии высшей водной растительности. Новое прикладное направление экологии – экологическая инженерия, или экотехнология, – предлагает ряд вариантов решения проблемы обезвреживания сточных вод, в частности с использованием технологии «constructed wetlands».

«Constructed wetlands» – это экологически сконструированные болотные экосистемы, объединяющие физические, химические и биологические про-

цессы, вовлекающие болотную растительность, почвы и связанные с ними микробные сообщества в процесс очистки сточных вод. Создаются системы, которые, при условии низкой стоимости и минимальных требований к обслуживанию, управляются, главным образом, естественной энергией (Солнце и гравитация) и способны к самоподдержанию протекающих в них процессов. При этом они надежны и высокоэффективны в трансформации и удалении загрязнителей сточных вод независимо от сезона года. Первичная функция большинства «constructed wetlands» – это сохранение и улучшение качества воды. Дополнительно выполняются такие функции, как первичное производство органического углерода растениями; производство кислорода через фотосинтез; сокращение экспорта органического материала и питательных веществ в находящиеся ниже экосистемы; создание культурного значения для образовательных и рекреационных ресурсов.

В настоящее время в русском языке нет общепринятого эквивалента термину «constructed wetlands». В научной литературе встречаются такие определения, как «биоплато», «биоинженерные сооружения», «биологические» и «ботанические площадки», нередко используется простая транслитерация выражения «constructed wetlands». Принципиальное строение «constructed wetlands» можно представить в виде четырех основных элементов: водоупорный слой, фильтрующий слой, болотные растения, устройства для равномерного распределения стоков по площади болота и регулирования уровня воды в нем.

В литературе и на практике «constructed wetlands» делят на два типа в зависимости от местоположения гидравлической проектной линии. Free water surface (FWS) wetlands (или surface flow wetlands) – системы поверхностного потока. Внешне они очень напоминают естественные болота наличием стоячей воды и водных растений, укорененных в почвенном слое на дне болота. Сточные воды в таких системах проходят через листья, стебли и основания растений. Vegetated submerged bed (VSB) systems (или subsurface flow wetlands) – системы подповерхностного потока, по внешнему виду не похожи на естественные болота: они не имеют открытых водных пространств, постоянного уровня воды. Такие системы представляют собой ложе из фильтрующей среды (типа щебня, малых камней, гравия, песка или почвы), которое засаживается водными растениями. При правильном проектировании и эксплуатации сточные воды проходят систему ниже поверхности среды, в контакте с корнями и ризосферой растений. Кроме того, отдельно выделяется vertical flow wetland – система вертикального потока. Такой тип «constructed wetlands» представляет собой типичный вертикальный песчаный или гравийный фильтр, засаженный водными растениями [1].

Использование болот для обработки сточных вод – идея не новая. Тысячи лет назад естественные болота использовались китайцами и египтянами для очистки жидких стоков. Однако первые «constructed wetlands» начали эксплуатироваться в Австралии лишь с 1904 г. После этого вплоть до 1950-х гг. в литературе случаи использования подобных сооружений водоподготовки практически не встречались. В начале 1950-х гг. в Европе и Германии были проведены первые попытки использовать болота и заболоченные территории

для удаления различных загрязнителей из воды (Kathe Seidel). Первые полномасштабные «constructed wetlands» поверхностного стока (FWS CW) были построены для очистки сточных вод кемпинга в Нидерландах в 1967–1969 гг. После этого опыта в Нидерландах за несколько лет было построено еще около 20 «constructed wetlands». Однако системы поверхностного стока не получили массового распространения в Европе, доминирующим типом здесь стали «constructed wetlands» с горизонтальным подповерхностным потоком (HF CW).

Первый полномасштабный проект такого «constructed wetland» был построен в 1974 г. в Отфрезене (Othfresen) в Германии. Поначалу HF CW использовали главным образом тяжелые почвы, часто с высоким содержанием глины. Эти системы имели очень высокий эффект очистки, но из-за низкой гидравлической проницаемости быстро происходило закупоривание и системы начинали работать как «constructed wetlands» поверхностного потока. В конце 1980-х гг. в Великобритании почвы в «constructed wetlands» были заменены грубым материалом (очищенный гравий). После этой доработки с 1980-х гг. технология очистки «constructed wetlands» быстро распространилась по всему миру [2]. В США полномасштабное изучение «constructed wetlands» началось лишь спустя 17 лет после первых попыток европейцев: исследователями Соединенных Штатов Америки в Chapel Hill (Северная Каролина) было начато пятилетнее изучение использования комбинации конструированного эстуария и естественного засоленного болота для очистки городских сточных вод [1]. В 1973 г. первый полномасштабный «constructed wetland», состоящий из последовательности – болота, водоема и луга, был построен в Brookhaven (Нью-Йорк).

В последнее время в связи с обострением экологических проблем и необходимостью поиска наиболее эффективных их решений внимание к уникальной технологии очистки сточных вод с помощью «constructed wetlands» усилилось, а изучение данного метода стало более детальным. Многие ученые ведут поиск наиболее эффективного типа «constructed wetlands». Так, например, Гуанг Джин с соавт. (2002) определяют FWS CW как наиболее эффективные сооружения для сокращения концентрации аммония и нитратов в сточных водах, что объясняется чрезвычайно высоким уровнем нитрификации в системах данного типа [3]. Также благодаря значительному воздействию солнечного света на системы с поверхностным потоком они более эффективны в удалении *E. coli*. Однако в последнее время исследователи, занимающиеся системами почвенно-болотной очистки, сходятся во мнении, что комбинация FWS и VSB CW в одной системе может существенно увеличить эффективность удаления загрязнителей сточных вод [4].

Один из главных вопросов в функционировании «constructed wetlands» – роль болотной растительности. В случае «constructed wetlands» поверхностного потока наибольшую эффективность в удалении типичных загрязнителей сточных вод (твердые взвешенные вещества и БПК) имеют те ячейки «constructed wetlands», которые засажены растительностью, хотя механизмы, с помощью которых растительные сообщества усиливают деятельность по очистке, еще не полностью определены. Считается, что в «constructed wetlands» поверхностного потока первичная роль надводных растений – это

обеспечение структуры для усиления хлопьеобразования, седиментации и фильтрации взвешенных веществ. Влияние болотной растительности на удаление поллютантов зависит, по мнению ряда исследователей, от времени гидравлической задержки сточных вод в системах «constructed wetlands».

Так, например, в горизонтальных подповерхностных системах с длительным временем гидравлической задержки влияние растительности значительно, в то время как в периодически загружаемых вертикальных системах, которые имеют короткое время гидравлической задержки, роль растений в удалении загрязнителей минимальна. В зимний период года надводная растительность также не теряет своего значения, ее функции – изолирование водной поверхности от низких температур, захватывание падающего и дрейфующего снега и сокращение последствий тепловпотерь от деятельности ветра [1].

В функционировании «constructed wetlands» важно не только само наличие растительности. На данный момент существует немало публикаций, демонстрирующих значительный эффект от правильного выбора видового состава растений для «constructed wetlands». Подбор наиболее подходящих видов растений для засаживания «constructed wetlands» должен проводиться проектировщиком системы исходя из местных климатических и природных условий. Самыми распространенными видами макрофитов в «constructed wetlands» можно назвать тростник, рогоз и камыш. На современном этапе немало внимания уделяется сбору статистических данных о различиях в эффективности удаления загрязнителей среди этих видов растений. Например, в Iron Bridge Wetland (Florida) ведется мониторинг «constructed wetlands» поверхностного стока из двух ячеек, главное отличие между которыми – доминантные виды растений (камыш и рогоз) [1]. Дж. Туллен с соавт. (2005) указывают на необходимость управления посадками растений в «constructed wetlands» [5]. Для повышения эффективности очистки стоков они предлагают использовать особую конфигурацию посадки растений – на возвышениях, перпендикулярных потоку очищаемых стоков и окруженных достаточно глубокими водными пространствами. По мнению авторов, это позволит сохранить растительность здоровой и не даст ей расширяться в неподходящем для функционирования «constructed wetlands» направлении.

Из исследований, посвященных другим функциональным элементам «constructed wetlands» и способам увеличения их эффективности, можно выделить следующие. Опыт Германии и долговременные исследования гидравлики «constructed wetlands» с различными почвенными параметрами показали, что наилучшим фильтрующим слоем по отношению к гидравлическим условиям и удалению загрязнителей является сочетание песка и гравия [1].

На примере фильтров «constructed wetlands» пассивного вертикального потока, используемых для очистки шахтных сточных вод, исследовалось влияние гранулированной среды с разными сорбционными способностями. Сравнение эффективности очистки стоков от свинца, меди и БПК<sub>5</sub> показало, что нет дополнительной пользы от использования дорогой сорбционной среды типа гранулированного активированного угля для улучшения деятельности биомассы, по крайней мере, в течение первых 10 месяцев функциониро-

вания «constructed wetlands» [6]. Значительного повышения уровня нитрификации и денитрификации в пределах «constructed wetlands» можно добиться добавлением в систему дополнительных поверхностей, например прутьев. В [2] представлена оценка нитрифицирующей и денитрифицирующей способности различных поверхностей в «constructed wetlands» (неповрежденные ядра осадка, старые сосновые и еловые прутья, отростки местных растений) в удалении общего азота. Наиболее высокими уровни нитрификации оказались на прутьях. Уровни потенциальной денитрификации были самыми высокими на иловом осадке [7]. Т. Хэдли установил, что при увеличении глубины ложа фильтрующей загрузки в SSF HF выше стандарта 0,5 м эффект очистки не изменяется, кроме того, более мелкие ложа могут на практике улучшить работу «constructed wetlands» [8].

Ряд научных работ посвящен или затрагивает тему сезонных колебаний в функционировании «constructed wetlands» по очистке сточных вод. В средиземноморских экологических условиях процентное сокращение бактерий в течение зимы ниже в сравнении со всеми другими сезонами [5]. Максимальное удаление бактерий отмечается в условиях высокой солнечной радиации и высокой температуры [9]. Удаление аммиака в «constructed wetlands» изменяется циклически по сезонам года. Однако четкой зависимости от таких сезонных факторов, как температура, уровень массовой нагрузки и солености стоков, на удаление аммиака в системе «constructed wetlands» выявлено не было [10].

В северных районах основной проблемой, связанной с технологией «constructed wetlands», является ее функционирование при низких температурах. Опыт применения систем «constructed wetlands» в Дании (130 сооружений), Швеции и Норвегии (71), Канаде (67) и Северной Америке (600) показывает, что искусственно созданные заболоченные территории в качестве сооружений доочистки стоков являются эффективными даже при низких температурах. При этом зимнее снижение активности систем незначительно по сравнению с теплым сезоном [11].

Среди двух типов «constructed wetlands» преимущество в более холодном климате имеют системы подповерхностного стока, т.к. очистка происходит ниже уровня поверхности земли, а значит, и бактериальные сообщества изолированы и защищены от воздействия холодного воздуха. Температура и другие сезонные изменения климатических условий влияют и на биологическую, и на физическую активность в пределах системы [1].

Вопрос о возможности полноценного использования «constructed wetlands» в условиях зимы был решен на основе опыта ряда северных стран. Изоляция заболоченного участка снежным, ледяным и естественным растительным покровом позволяет «constructed wetlands» оставаться полностью функциональным в условиях низких температур [11]. Опыт включения заболоченных участков в систему водоподготовки в Норвегии показал высокую эффективность метода. Причем процессы очистки проходили практически одинаково как летом, так и зимой, с довольно высоким уровнем удаления органического вещества (БПК, ХПК), фосфора и азота [12].

Некоторые исследования утверждают, что для оптимизации функционирования «constructed wetlands» подповерхностного потока в холодном климате особенно важны присутствие растительности и правильный выбор видов растений. По данным В. Аллена с соавт., влияние присутствия растений и различия среди их видов значительно больше в состоянии покоя при температуре 4°C, чем во время периода роста растений (24°C) [13].

Возвращаясь к истории использования «constructed wetlands», важно отметить, что в 1970-х и 1980-х гг. «constructed wetlands» строились исключительно для очистки хозяйственно-бытовых или городских стоков. И лишь с начала 1990-х гг. «constructed wetlands» 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 предприятий АПК [14], промышленные (химическая, целлюлозно-бумажная промышленность и т.д.), стоки сельскохозяйственных ферм) [14, 15], шахтные воды [16] или избыточный активный ил.

Системы «constructed wetlands» показали высокую эффективность в решении проблемы очистки стоков с повышенными концентрациями питательных веществ в Норвегии [4]. В Израиле с помощью метода «constructed wetlands» решается проблема дефицита количества и качества пресной воды через ее подготовку для вторичного использования (удаление взвешенных веществ, органического вещества, колиформных бактерий) [17].

Для развивающихся стран, таких как Танзания, одними из главных преимуществ использования естественной очистки стоков с помощью «constructed wetlands» являются отсутствие потребления энергии такими системами и простота эксплуатации [17]. В России имеется опыт использования «constructed wetlands» в арктических условиях, где проявляется одно из существенных преимуществ подобных систем перед другими методами водоподготовки – сохранение эффективности очистки сточных вод даже при низких температурах и отсутствие сезонных колебаний эффективности. 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 [18]. В условиях еще более низких среднегодовых температур (–1,5°C) и морозных зим (до –53°C) эффективно эксплуатируется несколько систем подповерхностного и поверхностного стоков в Томской области [19].

Таким образом, технологию обезвреживания сточных вод «constructed wetlands» можно назвать удовлетворительным дополнением или, в ряде случаев, альтернативой традиционным методам интенсивной очистки загрязненных вод, о чем свидетельствует как обширная география распространения описанной технологии, так и многочисленные исследования в области экологической инженерии систем защиты водных объектов от загрязнения сточными водами.

*Литература*

1. *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.
2. *Ymazal J.* Constructed wetlands for wastewater treatment // *Ecological engineering*. Editorial. 2005. P. 3–5.
3. *Jin G., Kelley T., Freeman M., Callahan M.* Removal of N, P, BOD<sub>5</sub>, and Coliform in Pilot-Scale Constructed Wetland Systems // *International Journal of Phytoremediation*. 2002. Vol. 4, № 2. P. 127–141.
4. *Ran N., Agami M., Oron G.* A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel // *Water Research*. 2004. № 38. P. 2241–2248.
5. *Thullen J., Sartoris J., Nelson S.M.* Managing vegetation in surface-flow wastewater-treatment wetlands for optimal treatment performance // *Ecological Engineering*. 2005. № 7. P. 125–130.
6. *Scholz M., Xu J.* Comparison of constructed reed beds with different filter media and macrophytes treating urban stream water contaminated with lead and copper // *Ecological Engineering*. 2002. № 18. P. 385–390.
7. *Kallner S., Eriksson P., Martins I.* Potential Nitrification and Denitrification on Different Surfaces in a Constructed Treatment Wetland // *Journal of Environmental Quality*. 2003. № 32. P. 2414–2420.
8. *Headley T.R., Herity E., Davison L.* Treatment at different depths and vertical mixing within a one metre deep horizontal subsurface flow wetland // *Ecological Engineering*. 2005. № 7. P. 260–276.
9. *Zdragas G., Zalidis C., Takavakoglou V. et al.* The Effect of Environmental Conditions on the Ability of a Constructed Wetland to Disinfect Municipal Wastewaters // *Environmental Management*. 2002. Vol. 29, № 4. P. 510–515.
10. *Jing S., Lin Y.* Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan // *Environmental Pollution*. 2004. № 127. P. 291–301.
11. *Jenssen P.D. et al.* Potential use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Northern Environments // *Water Science Techniques*. 1993. Vol. 28, № 10. P. 149–157.
12. *Mæhlum T., Jenssen P.D., Warner W.S.* Cold-climate constructed wetlands // *Water Science and Technology*. 1995. Vol. 32, № 3. P. 95–101.
13. *Winthrop C. Allen, Paul B. Hook, Joel A., Biederman and Otto R. Stein.* Temperature and Wetland Plant Species Effects on Wastewater Treatment and Root Zone Oxidation // *Journal of Environmental Quality*. 2002. № 31. P. 1010–1016.
14. *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.
15. *Hadlington S.* An interestind reed // *Chemistry Britain*. 1991. Vol. 27, № 4. P. 229.
16. *Dunbabin J.S., Bowner K.H.* Potential use of constructen wetlands for treatment of industrial wasterwaters containing mettals // *Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 111, № 2/3. P. 56–60.
17. *Mashauri D.A., Mulungu D.M.M., Abdulhussein B.S.* Constructed wetland at the University of Dar Es Salaam // *Water Research*. 2000. Vol. 34, № 4. P. 1135–1144.
18. *Верецагина И.Ю., Василевская Н.В.* Искусственное биоплато в Арктических широтах // *Экология производства*. 2004. № 4. С. 18–21.
19. *Семенов С.Ю., Шелепова Л.И.* Водно-болотная очистка сточных вод // *Безопасность жизнедеятельности*. 2008. № 1. С. 37–38.

Поступила в редакцию 13.08.2010 г.

Elena E. Sivkova, Sergey Yu. Semenov

*Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia*

**USING «CONSTRUCTED WETLANDS» TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT IN SMALL COMMUNITIES AND ENTERPRISES**

*Today ecological engineering offers one of the most perspective technologies for wastewater treatment called “constructed wetlands” treatment systems. “Constructed wetlands” are artificial wetlands used as wastewater treatment plants which rely upon natural microbial, biological, physical and chemical processes to treat wastewater with minimal economic costs. In recent years numerous researches have covered various aspects of using «constructed wetlands» such as the role of wetland vegetation and its species in systems, using different types of substrate, vegetation management. All this aspects can influence increasing the system’s efficiency in wastewater treatment. Based on the analysed literature one can conclude that the described technology is a successful alternative to standard methods of wastewater treatment. Further researches can extend the field of possible applications and the area of distribution of this unique «constructed wetlands» technology.*

**Key words:** *«constructed wetlands»; ecological engineering; wastewater treatment; treatment plants.*

*Received August 13, 2010*