

DOI 10.22363/2313-2310-2019-27-4-255-263
УДК 504.05/06

Научная статья

Принципы проектирования фито-очистных систем

К.Ю. Рыбка¹, Н.М. Щеголькова^{1,2}

¹Институт водных проблем РАН

Российская Федерация, 117971, Москва, ул. Губкина, 3

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

Аннотация. Фито-очистные системы (ФОС) – неглубокие поверхностные или подземные водотоки, засаженные высшей растительностью и предназначенные для очистки сточных вод – в последние десятилетия активно применяются в мировой практике. Универсальных принципов проектирования таких систем не существует, так для каждой комбинации ландшафта (в котором расположена ФОС) и качества сточной воды подбирается индивидуальный тип ФОС. В статье приводится обзор принятых в мире принципов расчета основных технологических параметров ФОС (выбор типа ФОС, расчет площади ФОС, времени пребывания воды в системе, выбор фильтрующей среды и т. д.), разработанных на базе многочисленных функционирующих объектов. Приведенные в статье рекомендации применимы для малых и средних ФОС, предназначенных для очистки хозяйственно-бытовых, ливневых и сельскохозяйственных стоков.

Ключевые слова: очистка сточных вод, фито-очистные системы, проектирование ФОС

Введение

Фито-очистные системы (ФОС) являются адаптивной технологией, и корректирование тех или иных параметров проектирования или применение специальных технических приемов позволяет использовать ФОС для решения разноплановых задач. В статье приведены рекомендации по проектированию ФОС для эффективного удаления взвешенных веществ, биогенных элементов, органического вещества (в том числе ксенобиотиков) и обеззараживания в климатических условиях РФ (включая регионы с холодным климатом), разработанные на основе исследования функционирования ФОС в РФ, а также в результате анализа литературных данных, адаптированных для нашей страны с учетом существующих нормативов, состава сточных вод и климатических особенностей.

Выбор типа ФОС

Системы открытого типа (с потоком воды над поверхностью воды) в общем случае рекомендуются для очистки ливневого стока, так как они обладают высокой устойчивостью к резким скачкам гидравлической нагрузки и не заиливаются в результате накопления взвешенных веществ, которыми обычно богаты ливневые стоки. При этом в начале и в конце ФОС рекомендуется расположить более глубокие зоны. Такая зона в начальной части ФОС будет способствовать более равномерному распределению потока и осаждению крупнодисперсных взвешенных веществ, а в конце ФОС – препятствовать попаданию донных отложений из ФОС в водоприемник.

Для хозяйственно-бытовых стоков наиболее эффективны, как правило, подповерхностные ФОС (для индивидуальных домохозяйств рекомендуются ФОС на основе «французской системы» – с подповерхностным вертикальным потоком [1]). Подповерхностные ФОС характеризуются большей площадью контакта сточных вод с загрузкой, которая является субстратом для развития прикрепленных микроорганизмов, осуществляющих микробиологические процессы очистки, присутствуют как аэробные (в верхней части), так и анаэробные условия (в нижней части ФОС), что способствует удалению азота за счет процессов нитрификации и денитрификации, а также очистке от ксенобиотиков.

Для сельскохозяйственных стоков возможно использование как открытых, так и подповерхностных ФОС (в случае, если содержание взвешенных веществ в стоках не приведет к коьматажу). Для решения более сложных задач применяются гибридные ФОС.

Предварительная очистка

В зависимости от конфигурации ФОС и состава поступающих стоков необходимо применение тех или иных технологий предварительной очистки. Если ФОС используется как единственная ступень очистки (например, при очистке ливневых стоков), то в рамках предварительной очистки достаточно пропустить сточные воды через решетки для удаления крупного мусора. Если же ФОС используется для доочистки (вторичной или третичной), то в качестве первичной очистки применяется септик, жируловитель, отстойник или эмшерский колодец.

Площадь ФОС

Существует несколько подходов к расчету площади ФОС. Наибольшее распространение получил метод, основанный на доведении воды до необходимого значения БПК [2]. Удаление органических веществ само по себе часто является основной задачей ФОС, кроме того, снижение БПК связано с удалением взвешенных веществ и азота.

При расчете *ФОС с открытой водной поверхностью* сначала рассчитывается время пребывания воды по формуле (1) или (2):

$$t = \frac{2,7(\ln C_i - \ln C_e + \ln F)}{1,1^{T-20}} \quad (1)$$

ИЛИ

$$t = \frac{\ln C_i - \ln C_e + \ln F}{65K_T}, \quad (2)$$

где t – время пребывания, сутки; C_i – концентрация БПК на входе в ФОС, мг/л; C_e – необходимая концентрация БПК на выходе из ФОС, мг/л; F – доля БПК, приходящаяся на водорастворимые соединения (не осаждающиеся в форме взвешенных веществ в начальной зоне ФОС), выраженная как отношение водорастворимого БПК к общему БПК, в долях единицы; T – температура воды, °С; K_T – константа скорости реакции (зависит от химического состава стоков и температуры), 1/сут.

C_i и F измеряются в надосадочной жидкости на выходе из блока предварительной очистки. Рекомендуется проводить изменения в разные сезоны и использовать максимальные значения C_i и F , а температуры – минимальные. Значения F обычно находятся в диапазоне от 0,5 для хозяйственно-бытовых до 0,9 для сельскохозяйственных стоков. Что касается K_T , то при температуре 20 °С для открытых ФОС часто используется значение 0,0057/сут., расчет при другой температуре производят по формуле (3):

$$K_T = K_{20} \Theta^{T-20}, \quad (3)$$

где K_{20} – константа скорости при температуре 20 °С, 1/сут.; Θ – температурный коэффициент, равный 1,056 при температуре ниже 20 °С и 1,047 при температуре выше 20 °С.

Далее, зная время пребывания, гидравлическую нагрузку и глубину воды в ФОС, можно рассчитать необходимую площадь ФОС по формуле (4):

$$A = \frac{t}{d \frac{n}{Q}}, \quad (4)$$

где A – площадь ФОС, м²; t – время пребывания, сут.; d – глубина воды в ФОС, м; n – порозность, доли единицы; Q – средняя гидравлическая нагрузка, м³/сут.

При расчете ФОС с открытой водной поверхностью порозность необходима для учета подводных частей растений (под порозностью здесь понимается отношение объема, занимаемого водой, к общему объему, занимаемому водой и растениями). Например, порозность системы, засаженной камышом, составляет около 0,86, а тростником – 0,98 [2].

При проектировании *подповерхностных ФОС* основная задача – избежать образования поверхностного потока. Фильтрация воды через загрузку ФОС в первом приближении описывается законом Дарси, который можно записать в виде (5):

$$q = k_s a s, \quad (5)$$

где q – скорость фильтрации, м³/сут.; k_s – гидравлическая проводимость единичной площади, перпендикулярной направлению потока, м³/м² в сут.; a –

площадь поперечного сечения, перпендикулярного направлению потока, m^2 ;
 s – напорный градиент (уклон уровня воды), м/м.

Во избежание заиливания системы предлагается использовать значения гидравлической проводимости, не превышающие 1/3 от расчетного, и значения напорного градиента, не превышающие 10 % от расчетного [2].

Площадь ФОС с подповерхностным потоком рассчитывается по формуле (6):

$$A = \frac{Q \ln \frac{c_e}{c_i}}{-K_T dn}. \quad (6)$$

Под n здесь подразумевается порозность загрузки, а K_T при температуре 20 °С для подповерхностных ФОС обычно составляет около 1,104 в сутки (в отличие от 0,0057 в сутки для ФОС с открытой водной поверхностью).

Время пребывания

Время пребывания является одним из основных параметров проектирования ФОС, так как от него зависит полнота протекания процессов очистки. В первом приближении уменьшение концентрации поллютантов в ФОС описывается кинетикой реакций первого порядка и экспоненциально зависит от времени пребывания. Минимальное время пребывания в ФОС составляет 24–36 ч, однако на практике часто проектируют системы с намного большим временем пребывания (до нескольких недель для крупных ФОС).

Расчет времени пребывания по БПК производят по формулам (1) и (2), а зная длину и ширину (или площадь) ФОС – по формуле (7):

$$t = \frac{nLWd}{Q}, \quad (7)$$

где L – длина ФОС, м; W – ширина ФОС, м; Q – средняя гидравлическая нагрузка, рассчитанная как среднее арифметическое между потоком на входе и на выходе, $m^3/сут.$

Геометрия ФОС

ФОС легко встраиваются в ландшафт и могут иметь как геометрически правильную (прямоугольник, квадрат, круг), так и неправильную форму. При выборе формы ФОС рекомендуется использовать естественные особенности топографии местности и избегать образования полностью застойных зон. Крупные ФОС можно разделять на несколько параллельных рукавов для более удобного регулирования потока и обслуживания системы.

Что касается отношения длины к ширине, то для ФОС с открытой водной поверхностью рекомендуется 3:1–4:1 (длина больше ширины). При этом в начале системы можно создать более широкую зону, которая будет способствовать равномерному распределению поступающего потока.

Для подповерхностных ФОС соотношение длины, ширины и глубины ФОС определяет напорный градиент, величина которого важна для сохранения потока внутри фильтрующей среды (избежания потока по поверхности).

Рекомендуемое отношение длины к ширине для подповерхностных систем – от 0,4:1 до 3:1. Если основной задачей ФОС является очистка от фосфора, то длина ФОС должна превышать ширину.

Для открытых ФОС рекомендуется создание сложного рельефа дна с целью увеличения площади подводных поверхностей. Сложная микротопография (чередование перекатов и плесов, создание искусственных островов, перегородок на дне ФОС, глубоководных лагун и т. д.) приводит к удлинению и усложнению линии тока, происходит интенсификация осаждения, адсорбции, микробиологической активности и поглощения поллютантов водорослями.

Глубина ФОС

Регулируя глубину, можно управлять содержанием кислорода и создавать аэробные и анаэробные зоны в ФОС. Кроме того, при углублении ФОС увеличивается время пребывания. В районах с теплым климатом ФОС проектируют таким образом, чтобы глубина загрузки соответствовала глубине распространения корней растений (несколько десятков сантиметров), а при наличии холодных зим глубину увеличивают до одного метра во избежание промерзания системы. Рекомендуется проектировать ФОС с различными по глубине зонами. Так, в более глубоких зонах (например, открытых лагунах без растительности) происходит денитрификация и анаэробное разложение органики, а на мелководье – аэрация, нитрификация и другие аэробные процессы.

Загрузка

Загрузка в ФОС выполняет две основные функции: во-первых, она является субстратом для роста макрофитов и микроорганизмов, а во-вторых, на поверхности частиц субстрата происходят реакции сорбции. Кроме того, загрузка влияет на гидравлическую проводимость системы. При высокой концентрации взвешенных веществ в поступающих стоках тонкодисперсная загрузка (например, почвы тяжелого гранулометрического состава) заиливается, происходит кольматаж и ФОС выходит из строя. Поэтому в качестве загрузки для бытовых, ливневых и сельскохозяйственных стоков рекомендуется гравий или крупный песок (или комбинация слоев гравия и песка). Такая загрузка практически не подвержена кольматажу и способствует поддержанию аэробных условий в верхней части ФОС. При этом лучше использовать сортированный гравий или камень округлой формы (например, речная галька), чтобы избежать чрезмерного уплотнения материала. Если основной целью проектирования ФОС является удаление фосфора, то можно использовать специальную загрузку с высокой сорбционной емкостью по фосфору (например, Filtralite-P® и Utelite®).

Растительность

Растительное сообщество ФОС ассимилирует загрязняющие вещества в биомассу, а также служит субстратом для развития микроорганизмов и влия-

ет на их метаболизм и гидравлические свойства загрузки. Растения уменьшают скорость потока, способствует осаждению взвешенных веществ и препятствует ресуспензированию осадка.

В ФОС рекомендуется использовать аборигенную влаголюбивую растительность, так как она уже адаптирована к местным условиям. В умеренном поясе это чаще всего тростник (*Phragmites spp.*) и рогоз (*Typha spp.*), а также ситник (*Juncus spp.*), камыш (*Scirpus spp.*), болотница (*Eleocharis spp.*) и другие осоковые, болотный ирис (*Iris pseudacorus*), болотный аир (*Acorus calamus*), канареечник (*Phalaris arundinacea*); в качестве плавающей растительности можно применять кувшинковые (*Nymphaeaceae spp.*), эйхорнию (*Eichhornia spp.*) и лотос (*Nelumbo spp.*) – в южных районах. При подборе макрофитов необходимо учитывать их влаголюбивость, теневыносливость и холодостойкость, устойчивость к содержащимся в сточных водах загрязняющим веществам и способность их аккумулировать. Простоту посадки (посева) и стоимость также нужно принимать во внимание. При создании крупных ФОС рекомендуется комбинировать несколько видов растений (два доминирующих и три минорных), например, основными видами могут быть рогоз и тростник, а дополнительными – водный гиацинт, болотный ирис и кубышка. Также рекомендуется комбинировать плавающие, полупогруженные и погруженные растения. Можно подбирать растения, ассоциированные с необходимыми для осуществления тех или иных процессов очистки микроорганизмов.

Вокруг ФОС рекомендуется высаживать кустарники и деревья, которые затеняют поверхность ФОС, сглаживают температурные колебания, ветер и волны, препятствуют активному развитию водорослей, а также сами ассимилируют загрязняющие вещества.

Дополнительные приемы

В зависимости от каждой конкретной ситуации могут использоваться дополнительные приемы и приспособления. Это может быть защита от холода (создание мульчирующего слоя), искусственная аэрация, рециркуляция воды и т. д.

Мониторинг и обслуживание ФОС

При проектировании ФОС необходимо разработать план мониторинга ФОС и регламентных мероприятий. Мониторинг необходимо проводить регулярно, особенно в течение первых нескольких лет работы. В рамках мониторинга проверяют гидравлическую нагрузку и нагрузку по загрязняющим веществам, гидравлическую проводимость (для подповерхностных ФОС), уровень воды в системе, количество осадка, растительность, корректность работы инженерных конструкций, а также эффективность очистки. Рекомендуется проведение инспекции минимум два раза в год в течение первых двух лет работы ФОС, затем – один раз в год.

Рекомендуемые значения перечисленных параметров приведены в таблице.

Таблица

Рекомендуемые параметры проектирования ФОС малой и средней производительности для очистки бытовых, сельскохозяйственных и ливневых стоков

Параметры проектирования	Рекомендуемые значения
Тип сточных вод	Бытовые, сельскохозяйственные, ливневые
Загрязняющие вещества	Взвешенные вещества, азот, фосфор, органическое вещество (в том числе ксенобиотики), патогенная микрофлора
Гидравлическая нагрузка	До 1000 м ³ /сут.
Тип ФОС	Подповерхностные – для бытовых и сельскохозяйственных. Открытые – для ливневых и сельскохозяйственных
Предварительная очистка	Механическая (решетки) – обязательно. Септик, жиросушитель, отстойник или эмшерский колодец – дополнительно
Площадь ФОС	Расчет по БПК
Время пребывания	Минимум 24 ч
Отношение длины к ширине	3:1–4:1 для открытых ФОС. 0,4:1–3:1 для подповерхностных ФОС
Глубина	Чередование глубоких и мелких зон, средняя глубина – 1 м
Загрузка	Гравий + песок
Уклон	Дно – 0,5–2°. Поверхность – без уклона
Устройства для впуска/выпуска воды	Впуск – несколько распределительных труб. Выпуск – дамба, переливной водослив, регулируемая вертикальная напорная труба или гибкий кольчатый шланг диаметром не менее 30 см
Растительность	Болотная, несколько видов (тростник, рогоз, ситник, камыш, болотница)
Дополнительные приемы	Искусственная аэрация, рециркуляция, защита от холода
Мониторинг и обслуживание	Первые два года – 2 раза в год. Затем – 1 раз в год

Table

Recommended design parameters for constructed wetlands of low and medium capacity for domestic, agricultural wastewater and runoff treatment

Design parameter	Recommended value
Type of wastewater	Domestic, agricultural, runoff
Pollutants	Suspended solids, N, P, organic compounds (including xenobiotics), pathogenic microorganisms
Hydraulic loading	Up to 1000 m ³ /d
Type of constructed wetland	Subsurface – for domestic and agricultural wastewater. Free water surface – for agricultural wastewater and runoff
Pre-treatment	Mechanical (screens) – mandatory. Septic tank, grease trap, sediment basin or Emscher tank – optional
Constructed wetland area	Calculation based on BOD
Retention time	Minimum 24 hours
Length to width ratio	3:1–4:1 for free water surface wetlands. 0,4:1–3:1 for subsurface wetlands
Depth	Alteration of deep and shallow areas, medium depth – 1 m
Substrate	Gravel + sand
Slope	Bed – 0,5–2°. Surface – level
Inlet/outlet structures	Inlet – several distributing pipes. Outlet – dam, overflow spillway, adjustable vertical discharge pipe or flexible ring hose with a diameter of at least 30 cm
Plants	Macrophytes, several species (reed, cattail, rush grass, reed, marshland)
Optional steps	Artificial aeration, recirculation, protection from cold
Monitoring and maintenance	During first two years – twice a year. Then – once a year

Заключение

Основным критерием расчета ФОС (после выбора типа системы) является время пребывания, которое рассчитывается, как правило, на основе БПК. Для достижения большей эффективности работы ФОС минимальное рекомендуемое время пребывания – 24 ч (а для очистки от ксенобиотиков – минимум 48 ч). Остальные же параметры проектирования (такие как глубина и форма ФОС, плотность растительного покрова, устройства для регулирования уровня воды и др.) предназначены в том числе для обеспечения необходимого времени пребывания.

С другой стороны, существует экономическая потребность сокращения площади очистного сооружения в расчете на одного жителя (особенно в регионах с высокой плотностью населения, недостатком земельных ресурсов или высокой стоимостью земли). В таких случаях применяют подповерхностные и гибридные ФОС, площадь которых составляет всего 1–2 м² на условного жителя.

Благодарности. Работа подготовлена при поддержке РФФИ, проект № 18-29-25027.

Список литературы

- [1] *Masi F., Bresciani R., Martinuzzi N., Cigarini G., Rizzo A.* Large scale application of French reed beds: Municipal wastewater treatment for a 20,000 inhabitant's town in Moldova // *Water Science & Technology*. 2017. No. 76 (1). Pp. 134–146.
- [2] *A Handbook of Constructed Wetlands. A guide for creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic region / US EPA. Philadelphia, 1994. 53 p.*

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 01.08.2019

Дата принятия к печати: 15.12.2019

Для цитирования:

Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М. Принципы проектирования фито-очистных систем // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2019. Т. 27. № 4. С. 255–263. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-255-263>

Сведения об авторах:

Рыбка Ксения Юрьевна – аспирант, лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0941>. E-mail: kseniarybka@gmail.com

Щеголькова Наталия Михайловна – ведущий научный сотрудник, лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН; ведущий научный сотрудник, факультет почвоведения, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6274-058X>. E-mail: nshegolkova@mail.ru

Principles of constructed wetlands designing

Kseniia Y. Rybka¹, Nataliia M. Shchegolkova^{1,2}

¹Water Problems Institute of RAS

3 Gubkina St, Moscow, 117971, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University

1 Leninskiye Gory, bldg. 12, Moscow, 119991, Russian Federation

Abstract. Constructed wetlands (CW) – shallow surfaces or subsurface water bodies, planted with higher aquatic plants and designed to treat wastewater – have been actively used in world practice for the last decades. There are no universal principles for designing such systems, so for each combination of landscape (in which a CW is located) and the quality of wastewater, an individual type of CW is selected. The article provides an overview of the principles adopted in the world for calculating the main technological parameters of CWs (choice of the type of CW, calculation of the area of CW, the residence time of the water in the system, the choice of filtering medium, etc.) developed on the basis of numerous functioning objects. The recommendations given in the article are applicable for small and medium-sized CWs intended for the treatment of domestic, storm and agricultural wastewater.

Keywords: wastewater treatment, constructed wetlands, CWs design

Acknowledgments. The work has been prepared with the support of the RFBR, project no. 18-29-25027.

References

- [1] Masi F, Bresciani R, Martinuzzi N, Cigarini G, Rizzo A. Large scale application of French reed beds: Municipal wastewater treatment for a 20,000 inhabitant's town in Moldova. *Water Science & Technology*. 2017;76(1):134–146.
- [2] US EPA. *A Handbook of Constructed Wetlands. A guide for creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic region*. Philadelphia; 1994.

Article history:

Received: 01.08.2019

Revised: 15.12.2019

For citation:

Rybka KY, Shchegolkova NM. Principles of constructed wetlands designing. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2019;27(4):255–263. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2019-27-4-255-263>

Bio notes:

Kseniia Y. Rybka – postgraduate student, Laboratory of Water Protection, Water Problems Institute of RAS. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0941>. E-mail: kseniarybka@gmail.com

Nataliia M. Shchegolkova – leading researcher, Laboratory of Water Protection, Water Problems Institute of RAS; leading researcher, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6274-058X>. E-mail: nshegolkova@mail.ru