

Фито-системы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем

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

Обеспеченность малых поселений РФ высокоэффективными системами очистки бытовых стоков явно недостаточна. Данное обстоятельство во многом отражает особенности социально-исторического развития страны и является фактором, сдерживающим развитие территорий и решение насущных социальных и экологических проблем [1]. Острота проблемы существенно возрастает в периоды масштабной сезонной миграции населения из городов в пригороды, в коттеджные или дачные поселки, садоводческие товарищества и т.п. Стандартные подходы к решению этой проблемы – строительство очистных сооружений или прокладка коллекторов до существующих централизованных систем водоотведения, требуют существенных затрат. Существует ли возможность быстрого и кардинального решения проблемы, не столь затратного и не связанного, как это часто случается, с перегрузкой имеющихся коммуникационных сетей?



Рис. 1.
Примеры ФОС разных
типов (Португалия,
Польша, Германия)

¹ Ведущий научный сотрудник, д-р биол. наук, Лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: nshegolkova@mail.ru, тел. +7 499 783-31-15.

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

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

⁴ Аспирант, Лаборатория охраны вод, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, e-mail: kseniarybka@gmail.com, тел. +7 499 783-31-15

С 70-х годов прошлого века в мире активно развивается очистка воды с применением *фито-очистных систем* ФОС (известных как «искусственные болота» – Constructed Wetlands, Treatment wetlands, или Reed bed systems). Отличительной особенностью ФОС является их подобие естественным водно-болотным объектам, которые, будучи дополнены рядом технических элементов и встроены в естественный ландшафт, способны эффективно выполнять роль водоочистных систем. ФОС – это искусственно созданные очистные сооружения со специфическим составом микроорганизмов, развивающихся в корневой зоне растений и на иных субстратах, находящихся в водной среде (рис. 1).

Наибольшее количество ФОС действуют в настоящее время на территории Германии и США (десятки тысяч). Тысячи ФОС построены в Австралии, сотни – в странах Северной Европы. Структурное многообразие ФОС достаточно велико и зависит не только от климатических условий местности, но и от качества очищаемых вод. Данные сооружения широко используются для очистки бытовых, ливневых, промышленных (в основном пищевой отрасли) стоков, а также стоков от животноводческих комплексов, шахтных вод, элюатов свалок ТБО и др. С каждым годом происходит увеличение доли ФОС среди очистных сооружений различного типа. ФОС официально признаны в числе наилучших доступных технологий в США, Германии, Франции и десятках других стран, внедряющих данные системы водоочистки. Начиная с 90-х годов 20 века, после широкого внедрения ФОС в системы очистки сточных вод в малых поселениях, качество вод в малых реках Европы заметно улучшилось.

По местоположению гидравлической проектной линии и направлению потока воды ФОС делятся на четыре основных типа: ФОС со свободной водной поверхностью; ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком; ФОС с вертикальным подповерхностным потоком; комбинированные ФОС (рис. 2).

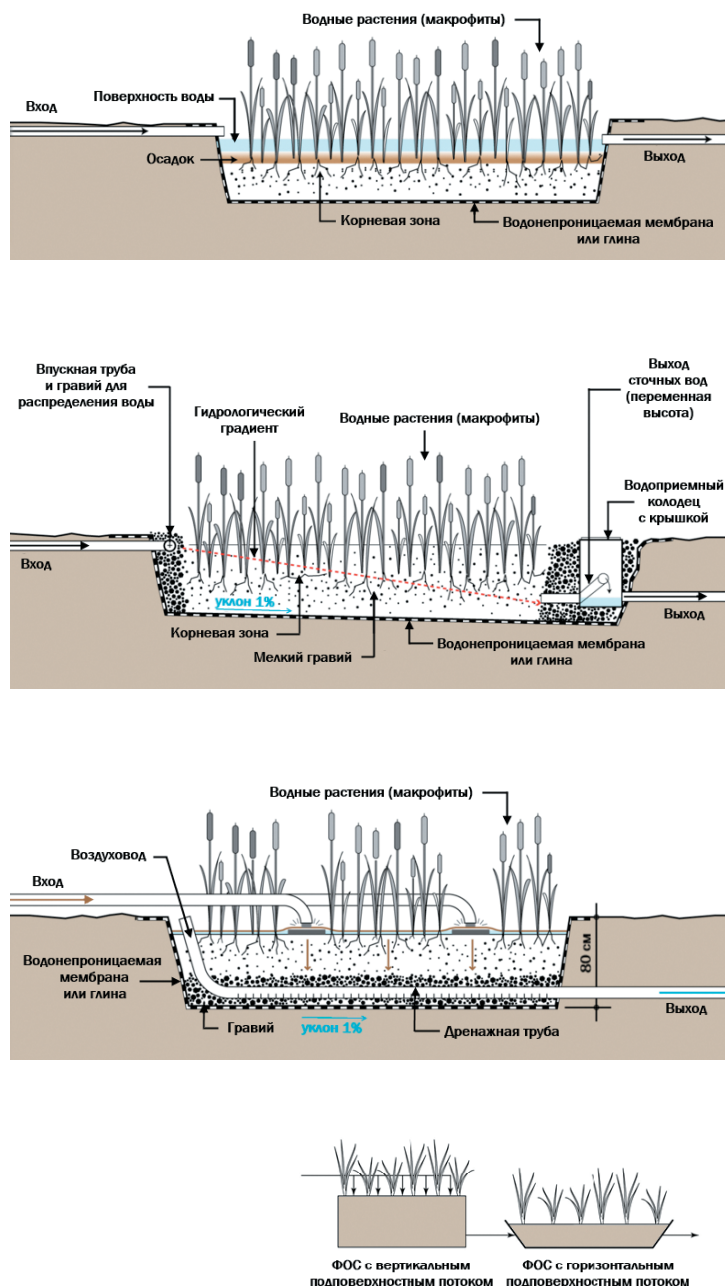


Рис. 2.

Основные типы ФОС.

- 1—ФОС со свободной водной поверхностью;
- 2—ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком;
- 3—ФОС с вертикальным подповерхностным потоком;
- 4—комбинированные ФОС

Функционирующие в мире фито-системы различаются не только по организации движения потока воды, но и по типу фильтрующего и загрузочного материала (гравий, песок, почва, торф, комбинация названных материалов), по типу искусственного растительного сообщества (моно- или поликультура, местные виды или привезенные, плавающие или закрепленные растения).

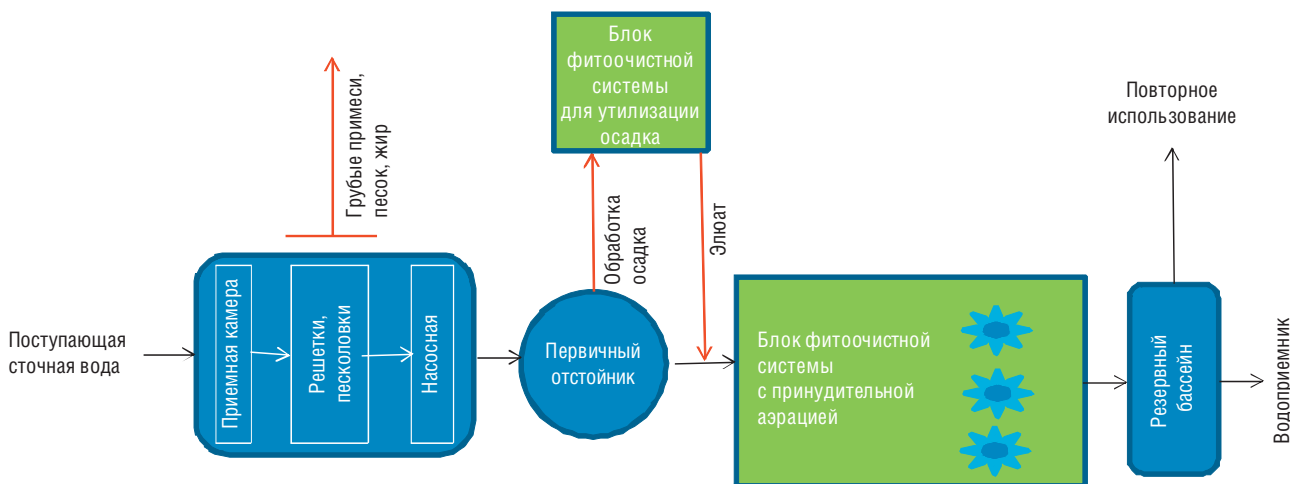
В Европе самыми распространенными являются подповерхностные ФОС. В последнее время получают распространение ФОС комбинированного типа, а также системы с применением инженерных узлов, обеспечивающих аэрацию, перенаправление потока, регулирование времени удержания стоков в отдельных блоках и т.п. Принудительная аэрация в ФОС появилась недавно, но успела зарекомендовать себя как очень результативный прием, повышающий эффективность очистки воды. Распространения в России эти системы не получили, в том числе, по причине отсутствия технических решений для адаптации к холодным зимам. В данной публикации обсудим особенности ФОС, наиболее подходящих для условий нашей страны.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ФОС

В качестве такого варианта рассмотрим ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком, с принудительной аэрацией, ориентируясь на потребности очистки сточных вод поселка с населением 1,5–3,0 тыс. жителей.

Технологическая схема всего сооружения состоит из следующих блоков (рис. 3): 1) грубой механической очистки (который формируется в соответствии с качеством поступающей воды), 2) первичного отстойника, 3) блока ФОС для очистки воды, 4) блока ФОС для аккумуляции и переработки первичного осадка. В состав сооружений также могут входить камера усреднения перед сбросом, а также накопительные емкости для очищенной воды, направляемой на повторное использование.

Рис. 3.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
СХЕМА ОЧИСТНОГО
СООРУЖЕНИЯ
С БЛОКОМ ФОС
ПОДПОВЕРХНОСТНОГО
ПОТОКА С
ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ
АЭРАЦИЕЙ



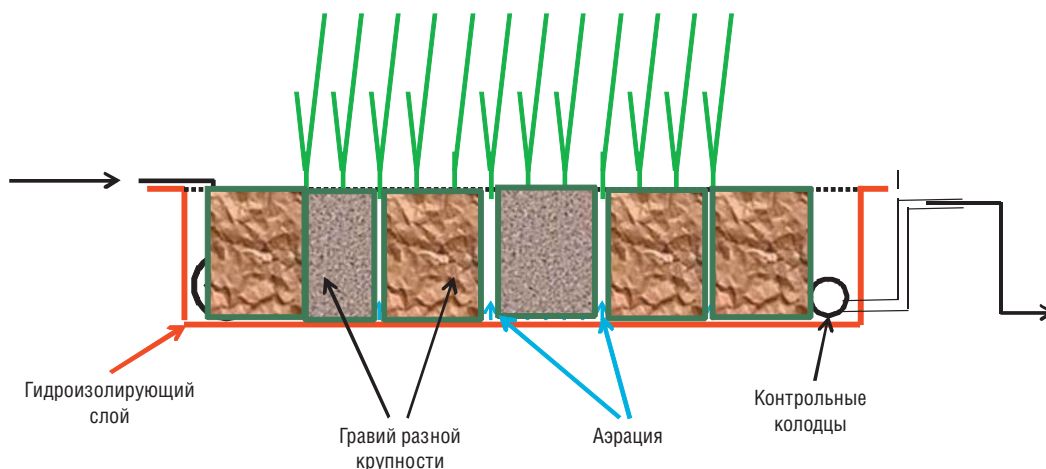


Рис. 4.
СХЕМА ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ
СИСТЕМЫ

Подземная часть ФОС (рис. 4) размещается в широком котловане, глубиной до 1,5 м, который предварительно выстилается гидроизолирующим материалом и заполняется фильтрующим материалом (загрузкой) – гравием или песком, подобранным с определенным чередованием крупности (по блокам). Поток воды в бассейне ФОС распределяется по ширине сооружения по возможности равномерно. Чередование зон с разными фильтрационными характеристиками позволяет в пределах одной системы поддерживать микробиологические ценозы аэробного или анаэробного типа. Выходящий поток направляют в усреднительный резервуар, а затем – в водоприемник.

ПРОЦЕССЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Органические соединения разлагаются в ФОС (как в аэробных, так и в анаэробных условиях) бактериями, развивающимися на подземных/подводных органах растений и на поверхности минеральной загрузки. Кислород, необходимый для аэробного разложения, поступает непосредственно из атмосферы за счет диффузии из корней и корневищ растений и/или в результате работы аэрационных систем (в случае применения принудительной аэрации). Роль высших растений чрезвычайно велика. Их корни, корневища, стебли являются своеобразной матрицей, формирующей аэробные и анаэробные зоны, чередующиеся в пределах очень небольших участков. Благодаря поступлению кислорода вблизи корневищ создаются микро-аэробные зоны, которые «опоясываются» анаэробными зонами. Таким образом, каждый корень формирует своеобразное сообщество бактерий, подпитывая его кислородом, ферментами и биодоступным органическим веществом.

Азот удаляется за счет комплекса процессов: нитрификации/денитрификации, процесса анаммокс, в том числе за счет ассимиляции растениями (в период роста биомассы). В ряде исследований [6] показано, что аммонификация, нитрификация, денитрификация и анаммокс-процесс (автотрофный процесс удаления азота за счет окисления аммонийного азота нитратным азотом) происходят в ФОС одновременно за счет различия окислительно-восстановительных и субстратных условий в разных микроразделах. Важной особенностью ФОС является использование отмирающей части органического вещества растений для проведения процесса денитрификации, в результате функционирования бактерий, осуществляющих гидролиз органического вещества. Азот удаляется в атмосферу в виде N_2 и оксидов.

Фосфор удаляется, в первую очередь, за счет обменно-сорбционных реакций на поверхности минеральной загрузки, путём образования нерастворимых и малорастворимых солей. Интенсивность удаления фосфора повышается в аэрируемых ФОС, а также в системах со специальными зонами загрузочного материала, богатого соединениями железа, кальция, алюминия. Нерастворимые соединения кальция, железа и алюминия в ходе работы ФОС сорбируются на минеральной загрузке (гравии)

и «наращивают» ее, что позволяет ФОС удалять фосфор десятки лет без замены минеральной загрузки, что подтверждается уже функционирующими системами.

Специфические органические загрязнения подвергаются глубокому разложению. Растения и микроорганизмы в ФОС формируют весьма эффективную систему по очистке стоков от органических токсичных соединений. Множество исследований показывают, что эффективность разложения некоторых из них (пестициды, лекарственные препараты, моющие средства) в ФОС может достигать более 99 %. При этом эффективность удаления токсичной органики в ФОС увеличивается с возрастом сооружения, так как в течение первых двух лет в ФОС формируется микробиоценоз, специфичный для каждого вида сточных вод.

Обеззараживание происходит биологическим путем: за счет отмирания фекальных бактерий в процессе естественных смен бактериальных сообществ от входа воды к выходу из ФОС в течение времени пребывания (более 8 суток), а также за счет потребления бактерий в трофической цепи (питание простейших) и ингибирования их корневыми выделениями растений. Возможность регулирования времени пребывания воды в ФОС позволяет достигать высокой степени обеззараживания сточных вод.

ОБРАБОТКА ОСАДКА

На схеме (рис. 3) обозначен блок ФОС для накапливания и одновременной утилизации осадка первичного отстойника. Это совершенно новое направление, которое сейчас активно развивается в фито-очистных технологиях. Важно отметить, что его реализация может быть проведена независимо от блока ФОС для очистки сточных вод. Подобные экологичные системы переработки осадка уже функционируют во Франции, Канаде, Германии и других странах. По своему устройству эта часть системы аналогична блоку ФОС по очистке воды, с важным отличием – крупность гравия в загрузке уменьшается по ходу движения воды. Поступающие вещества осадка перерабатываются за счет процессов разложения в корневой зоне растений. Объем этой части сооружения рассчитывается с учетом объема разлагаемого за год органического вещества. Элюат, вытекающий из этого блока, возвращается на очистку в основной блок ФОС. В результате глубокого разложения, накопления вещества в осадочном блоке ФОС происходит очень медленно.

Характеристика	Единицы измерения	Значения на входе	Значения на выходе
Взвешенные вещества	мг/л	45–85	2–14
ХПК	мгО/л	150–218	15–24
БПК	мгО/л	55–82	1–6
N _{общ.}	мг/л	45–78	7–11
N-NH ₄	мг/л	35–60	0,03–1,5
P _{общ.}	мг/л	3,2–8,9	0,02–0,6
Общее содержание колиформных бактерий (ОКБ)	КОЕ/100мл	7,7·10 ⁴ –3·10 ⁷	3,0·10 ¹ –2,9·10 ²

В отличие от открытых площадок, используемых для обезвоживания и стабилизации осадка в такой системе, отсутствуют запахи. Их выделению препятствует верхний слой, богатый корнями и микроорганизмами.

Эффективность очистки воды в ФОС

В табл. 1 приведены значения качества воды на выходе из сооружений с подповерхностным потоком с *принудительной аэрацией* (для зон с умеренным климатом) и максимальные значения по эффективности очистки.

Эффективность очистки (от биогенных элементов и ксенобиотиков) становится выше с увеличением возраста ФОС. Максимальной эффективности сооружения достигают после 2–3 лет эксплуатации (что сравнимо с периодом отладки процесса нитри-денитрификации или биологического удаления фосфора на средних и крупных сооружениях с активным илом). В Европе многие подповерхностные ФОС, созданные в 70-е и 80-е годы 20 века, продолжают эффективно функционировать. Таким образом, необходимость затрат на капитальный ремонт или реконструкцию данных систем не возникает в течение, как минимум, 40 лет [5].

Таблица 1.
Данные по качеству воды
в ФОС с горизонтальным
подповерхностным
потоком с принудительной
аэрацией, расположенных
в умеренном климате

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ФОС

Особенности проектирования ФОС определяются не только величиной нагрузки или качеством стоков, но и конкретными ландшафтными особенностями территории, что выдвигает повышенные требования к качеству и объему предпроектных изысканий, являющихся ключевым этапом проектирования.

В ФОС вода находится, обычно, 7–8 суток, что минимум в 10 раз дольше, чем в классических сооружениях биологической очистки сооружений, поэтому в расчете на 1 м³ обрабатываемой воды необходимый объем ФОС соответственно превышает объем сооружений

биологической очистки. С учетом глубины ФОС, которая, в свою очередь, в 5–10 раз меньше глубины аэротенков и отстойников, площадь их поверхности в десятки раз больше площади, занимаемой сооружениями биологической очистки. Поэтому важными составляющими водного баланса становятся приход воды с атмосферными осадками, испарение и инфильтрация – факторы, которые практически не учитываются при проектировании классических очистных сооружений. Кроме того, есть специфический параметр водного баланса – эвапотранспирация (испарение воды растениями). Таким образом, уравнение водного баланса включает в себя большее число параметров, в отличие от классических очистных сооружений.

Время пребывания рассчитывается в зависимости от качества поступающей воды, типа ФОС (глубина, расположение зон аэрации, тип загрузочного материала), фильтрационных характеристик загрузочного материала.

Учет особенностей климата России. Наличие холодных зим требует устройства терморегулирующего слоя, защищающего сооружение от промерзания зимой. Для такой защиты используется рыхлый материал, например, торф, легкие почвы, опилки и т.п., толщина которого определяется расчетом *теплового баланса* ФОС (рис. 5).

Расчеты авторов, выполненные для условий Московской области, показывают, что толщина слоя мульчирующего материала при приеме стоков (с температурой около 20°C) должна составлять около 10 см, чтобы процесс очистки воды оставался зимой столь же эффективным. Понижение уровня воды в зимний период создает дополнительный термоизолирующий слой из сухого гравия (рис. 5), что подтверждается эффективной работой ФОС на Аляске (США), Канаде, Ирландии, Швеции, Чехии и иных странах с холодными зимами. Заметим, что обустройство такой защиты не требует серьезных затрат и не связано с использованием больших объемов дополнительных материалов.

Площадные характеристики. Считалось, что слабой стороной ФОС является необходимость отведения под них значительных территорий. Развитие конструкций ФОС позволило существенно снизить удельные площади, необходимые для приема стоков в расчете на одного жителя. Для сооружения, технологическая схема которого приведена в данной статье, при очистке стоков от 2000 жителей площадь блока ФОС по очистке воды – около 5000 м², площадь блока ФОС по утилизации осадка – 1000 м², в сумме – около 0,6 га. Для сельской местности выделение такой площади, как правило, не составит проблемы.

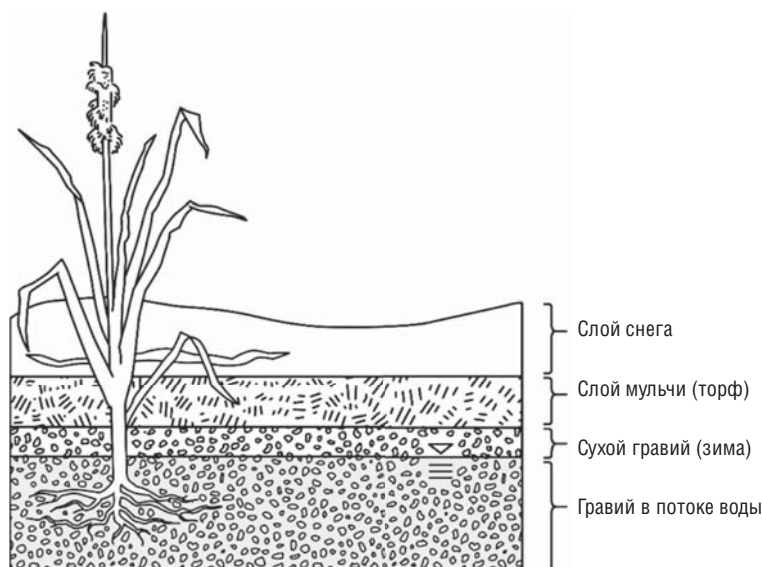


Рис.5.
ЗАЩИТА ФОС ОТ ВЫМЕРЗАНИЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Для сопоставления: площадь зданий и сооружений классической станции биологической очистки на такой расход составляет 100–150 м², однако площадь их санитарно-защитной зоны (даже при ее глубине 100 мм) – около 6 га. Поэтому, с учетом санитарно-защитных зон, потребность в площади для классических сооружений выше.

ЗАТРАТЫ НА СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЮ ФОС

Сравнение с капитальными затратами классического очистного сооружения (аэротенки с удалением биогенных элементов) показывает, что капитальные затраты при строительстве ФОС на 20–30 % ниже. В процентном отношении затраты на строительство ФОС складываются из позиций, приведенных в табл. 2.

Важно подчеркнуть, что ФОС имеют очень низкие эксплуатационные затраты и затраты на техническое обслуживание. Наиболее важной частью экономии в ФОС является отсутствие необходимости вывоза осадка, значительно меньшая численность персонала, не использование реагентов.

Затраты на строительство ФОС	%
Загрузка ФОС (гравий, песок)	34
Оборудование и комплектующие блока механической очистки (включая легковозводимое здание)	17
Оборудование блока ФОС	10
Комплектующие трубопроводов	8
Строительные работы (включая земляные работы)	31
ВСЕГО	100

Таблица 2.
СТРУКТУРА ЗАТРАТ НА ФОС (на основе данных по одному из конкретных объектов, реализуемых в России)

Таблица 3.
СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ФОС И КЛАССИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С АКТИВНЫМ ИЛОМ

Затраты	ФОС горизонтального типа с принудительной аэрацией	Очистные сооружения с активным илом (удаление биогенных элементов)
Общие затраты на электроэнергию, кВт час/м ³	0,18–0,20	0,45–0,60
Персонал, чел.	неквалифицированный персонал – 1 (наблюдения не каждый день)	инженер-технолог (в дневную смену) – 1, операторы – 4 (посменно)
Вывоз и депонирование осадка, м ³ /год	нет необходимости	около 300 м ³ (при влажности 80 %)
Применение реагентов для удаления фосфора	не применяются	не менее 5 т/год (по товарному реагенту)
Применение реагентов для обезвоживания осадка	не применяются	не менее 200 кг/год



Рис. 6.
Этапы строительства горизонтального ФОС
с поверхностным потоком и принудительной аэрацией



Сравнение эксплуатационных затрат ФОС и классических очистных сооружений с активным илом, работающих по современной технологии с удалением азота и фосфора (в расчете на очистное сооружение, принимающее бытовые стоки от 2000 жителей), приведено в табл. 3.

Строительство ФОС состоит из следующих этапов (рис. 6): земляные работы и планировка поверхности, создание бассейна за счет земляных работ и/или за счет строительства боковых стенок, создание гидроизоляционного слоя, прокладка аэрационной системы, засыпка гравия, посадка растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фито-очистные сооружения могут быть достойной альтернативой классическим очистным сооружениям с активным илом, применительно к малым и средним поселениям.

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

- высокая надежность сооружений в течение длительного времени, повышение эффективности очистки со временем;
- удаление загрязняющих веществ (в т.ч. ксенобиотиков) до нормативных требований за счет использования растительно-бактериальных сообществ;
- отсутствие необходимости применения реагентов для очистки воды, ее обеззараживания, а также для обезвоживания осадка;
- низкие эксплуатационные затраты, основанные на сравнительно незначительном энергопотреблении, малой потребности в обслуживании, отсутствии необходимости применения высококвалифицированного персонала, не использовании реагентов;
- экологическая совместимость с природными ландшафтами, эстетическая привлекательность;
- отсутствие неприятных запахов и возможность расположения практически вплотную к жилой застройке. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Чижев С.Г. Как изменилась очистка сточных вод в России за последние 10 лет? / Россия в окружающем мире – 2008. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: аналитический ежегодник / Отв. ред. Н.Н. Марфенин; под общей редакцией Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2008. – С. 97–119.
2. Щеголькова Н., Рыбка К., Диас В., Криксунов Е. Природный механизм с техническими элементами. Применение фито-сооружений для очистки сточных вод в различных климатических зонах / ВодаMagazine. № 12 (88) Декабрь 2014. С. 12–18.
3. Щеголькова Н.М., Диас В., Криксунов Е.А., Рыбка К.Ю. Оценка применения фито-систем для очистки сточных вод в России / Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение». 2013. С. 20–31.
4. DIAS V., KRIKSUNOV E., SHCHEGOLKOVA N. MULTI-FITOX-ADVANCED WASTEWATER TREATMENT SYSTEM USING AQUATIC EMERGENT MACROPHYTES / 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WETLAND POLLUTANT DYNAMICS AND CONTROL. OCTOBER 13–17, 2013 NANTES (FRANCE). P. 321
5. KADLEC, ROBERT H. TREATMENT WETLANDS / ROBERT H. KADLEC AND SCOTT WALLACE. (2009) – 2ND ED. P. CM. INCLUDES BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES AND INDEX. ISBN 978. LLC CRC PRESS IS AN IMPRINT OF TAYLOR & FRANCIS GROUP, AN INFORMA BUSINESS. 1048 P.
6. VYMAZAL JAN, KRÖPFELOVÁ LENKA. REMOVAL OF ORGANICS IN CONSTRUCTED WETLANDS WITH HORIZONTAL SUB-SURFACE FLOW: A REVIEW OF THE FIELD EXPERIENCE / SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 407 (2009) 3911–3922 P.