

Д.В. УНГУРЯНУ, кандидат технических наук
В.А. ВИРЛАН, аспирант
Технический университет Молдовы, Кишинев

СИСТЕМЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ КОММУНАЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ ФИЛЬТРАХ (ФИТОФИЛЬТРАХ)

Розглядаються відносно нові технології біологічного природного очищення стічних вод у штучних плавнях тобто у фітофільтрах з горизонтальним та вертикальним рухом води. Наведено описання рекомендованих процедур до проектування їх складових компонентів.

Ключові слова: природне біологічне очищення стічних вод, штучні плавні, горизонтальні та вертикальні фітофільтри.

Статья относится к одной из относительно новых технологий естественной/экстенсивной биологической очистки сточных вод в искусственных плавнях, в частности в фитофильтрах с горизонтальным и/или вертикальным направлением движения очищаемой воды. В статье приводится описание систем очистки в фитофильтрах, а также рекомендации по их проектированию.

Ключевые слова: естественная биологическая очистка сточных вод, искусственные плавни, фитофильтры, горизонтальные и вертикальные фитофильтры.

The paper to report on the relatively new natural/extensive biological wastewater treatment in constructed wetlands, particularly in reed bed filters with horizontal and/or vertical flows. In this work is described the extensive wastewater treatment fitofilters system and the proceeding of design and engineering of their component parts.

Key words: natural biological wastewater treatment, constructed wetlands, reed bed filters, vertical subsurface fitofilters, horizontal subsurface fitofilters.

Введение

Настоящая работа относится к одной из относительно новых технологий естественной/экстенсивной биологической очистки сточных вод – к системам очистки в искусственных плавнях, в частности, в почвенно-растительных фильтрах (фитофильтрах) с высшей водной растительностью, а именно в горизонтальных и/или вертикальных подпочвенных фитофильтрах.

Системы естественной очистки основаны на процессах самоочищения в водной среде и в почвах путем седиментации, фильтрации, биологического

разложения и под действием солнечного излучения. Биологические процессы самоочищения сточных вод в таких системах происходят благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, особенно бактерий прикрепленных на твердой подложке – стеблях растений и их корневищах.

Системы естественной биологической очистки в искусственных плавнях воспроизводят процессы самоочищения природных экосистем и включают ряд дополнительных средств с учетом разнообразия видов высшей водной растительности и почв:

- системы свободного движения сточной воды по поверхности – биологические пруды;

- системы ирригации энергетических растительных культур – поля орошения;

- системы фильтрации сточной воды под воздушной поверхностью фильтрующих почв – подпочвенные поля фильтрации с горизонтальным либо вертикальным потоком воды и засаженные макрофитами – фитофильтры, составляющие предмет настоящей статьи.

Системы экстенсивной биологической очистки сточных вод по определению занимают большие площади, чем интенсивные системы (аэротенки, биофильтры и их различные модификации и комбинации, использующие взвешенную и/или прикрепленную микрофлору выращенную и поддерживаемую искусственным способом), применяемые почти повсеместно в населенных пунктах имеющих централизованные системы канализации и не только. Однако экстенсивные системы, как правило, требуют меньших капиталовложений, а условия их работы/эксплуатации являются более легкими, гибкими и экономичными по затратам энергии.

Настоящая статья относится к фитофильтрам, предназначенным для автономной биологической бытовых сточных вод и, возможно, их смеси с промстоками содержащими аналогичные органические биоразлагаемые загрязнения, преимущественно предприятий пищевой промышленности. В принципе фитофильтры могут служить как в качестве единственной /самостоятельной ступени очистки в составе канализационных очистных сооружений, так и конечной ступени очистки или доочистки, в случае необходимости. Они могут обеспечивать удаление из сточных вод взвешенных веществ (ВВ) и органических загрязнений (ХПК и БПК), а в благоприятных условиях и нитрификацию аммонийного азота. В целом, фитофильтры могут обеспечивать и дезинфекцию сточных вод, но на данном этапе пока невозможно предложить конкретные рекомендации из-за недостатка соответствующих данных. Кроме того, при использовании фитофильтров невозможно гарантировать удаление из сточных вод соединений фосфора, для этого, при необходимости, следует предусмотреть дополнительную ступень очистки, предпочтительно химическое осаждение.

Фитофильтры. Концепция и практическое применение

В фитофильтрах реализуются различные механизмы очистки, включая:

а) *физические*, путем фильтрации сточной воды в пористой среде фильтрующего материала и корневой системы (удаление взвешенных веществ);

б) *химические*, путем осаждения, адсорбции, разложения благодаря УФ-облучению (уничтожение вирусов и патогенных бактерий) и реакций окисления-восстановления (удаление металлов);

в) *биологические*, благодаря развитию преимущественно прикрепленных а также свободноплавающих бактерий, осуществляющих биохимическое разложение органических загрязнений (ХПК и БПК), нитрификацию в аэробных зонах и денитрификацию – в анаэробных.

Таким образом, в фитофильтрах очистка сточных вод происходит в соответствии с принципом биологической очистки, преимущественно аэробной, проходящей в фильтрующей среде; при этом фильтрующий слой не промывается и не обновляется/регенерируется.

Фитофильтры являются предпочтительными сооружениями среди других сооружений естественной биологической очистки сточных вод в сельских местностях с небольшим количеством населения. Различают два типа фильтров засаженных макрофитами (фитофильтров): с вертикальным и горизонтальным направлением движения воды (рис. 1 а,б), при чем уровень воды в фильтрующем слое находится ниже воздушной поверхности, а фильтрующая загрузка предпочтительно состоит из гальки и песка, которые составляют пористую среду.

Фитофильтры состоят из следующих зон:

а) питания или ввода/поступления-распределения исходной сточной воды;

б) засаженной макрофитами, предпочтительно тростником (основная, рабочая);

в) сбора и выпуска очищенной воды.

Составные части этих зон включают: входные распределительные устройства исходной воды; фильтрующую загрузку с разными крупностью частиц и гидравлической проводимостью; засаженные и укорененные в фильтрующем слое макрофиты; микрофлору, состоящую из аэробного и анаэробного бактериального населения, позвоночных и беспозвоночных; поток очищаемой сточной воды, движущийся через фильтрующую загрузку и корневую систему растений; дренажные или сборно-выпускные устройства для очищенной сточной воды.

Растения/макрофиты в водной среде представляют элемент накопления питательных/биогенных веществ, а потребление загрязнений сточной воды связано с ростом растений и их воспроизводством. Сбор/покос растений ведет к постоянному и окончательному удалению ассимилированных загрязнений в системе фитофильтров. В водной толще фильтров стволы и корни растений служат опорой/поверхностью для прикрепления микробной популяции(био пленки). Растения способны переносить кислород и другие газы из атмосферы в воду через корневую систему.

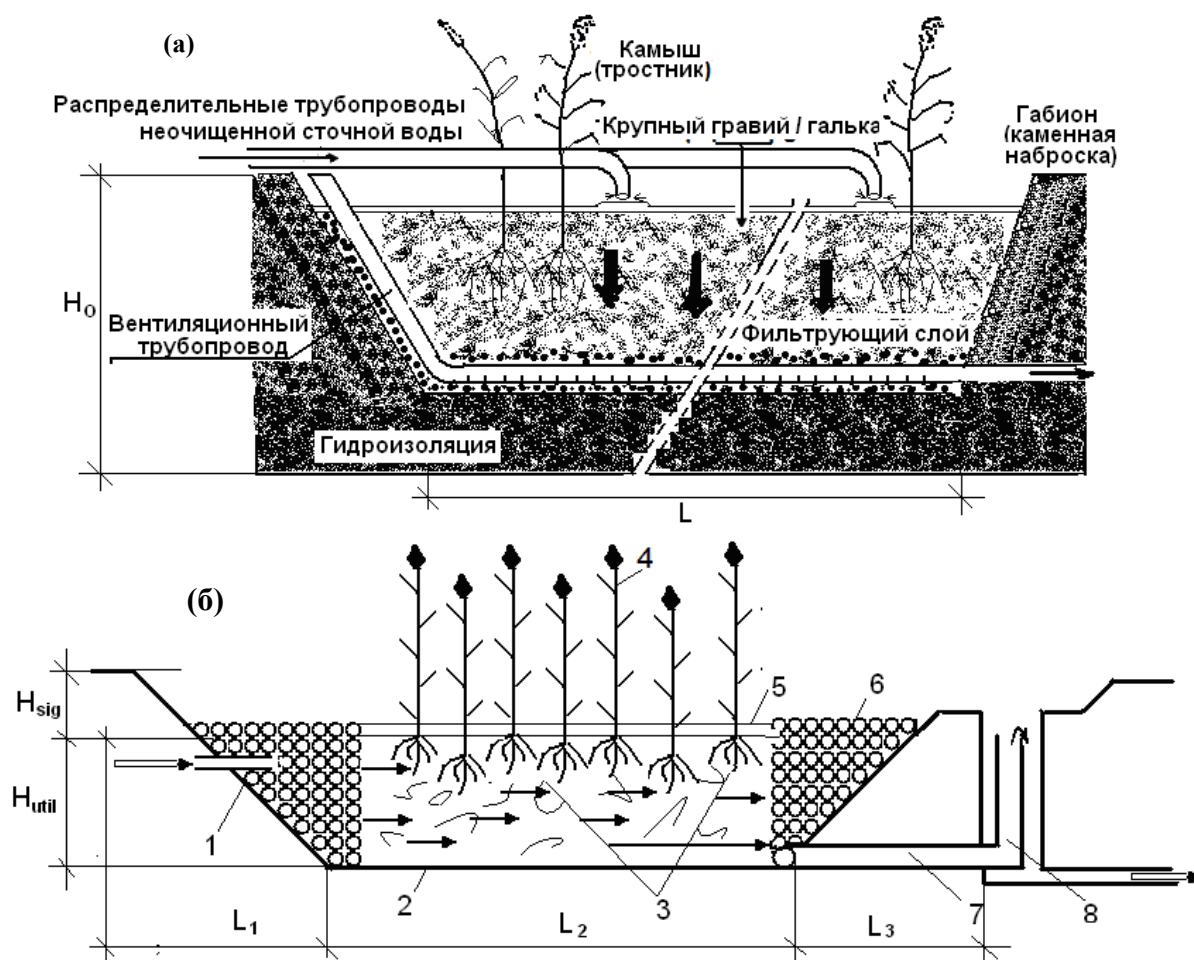


Рис.1. Фитофильтры: **(а)** с вертикальным направлением движения воды;
(б) с горизонтальным направлением движения воды:
1,6 – габионы; **2** – гидроизоляция; **3** – фильтрующий слой комбинированный с
корневой системой растений; **4** – макрофиты (тростник); **5** – воздушная поверхность
фильтрующей загрузки; **7** – трубопровод для отвода очищенной воды; **8** – гибкий
шланг для регулирования уровня воды в фильтре

Фильтрующие материалы включают щебенку, гравий, гальку, песок и различные фильтрующие почвы взятые по отдельности и расположенные послойно или в их комбинации друг с другом. Фильтрующая загрузка размещается на непроницаемой основе для предотвращения инфильтрации в подземные воды и для возможности обеспечения контроля уровня воды в фильтрующем слое фитофильтров. Сточная вода протекает/движется через фильтрующий слой, очищаясь при контакте с поверхностью фильтрующего материала и корней растений, покрытой биопленкой.

Эффективность процессов протекающих в фитофильтрах зависит от температуры и времени пребывания сточных вод в фитофильтре. Большая длительность контакта увеличивает удаление многих видов загрязнений, при высоких температурах (более 15°C) эффективность процессов очистки также более высокая.

Фитофильтры с горизонтальным потоком воды лучше сочетаются с неблагоприятным/суровым климатом, в то время как фитофильтры с вертикальным потоком более чувствительны к холоду.

Рекомендуемая форма фитофильтров в плане близка к прямоугольной. Максимальная площадь одной карты/площадки фильтров не должна превышать примерно 500 м², во избежание сложностей связанных с равномерным распределением очищаемой сточной воды.

Технологические схемы очистки сточных вод в фитофильтрах

Фитофильтры проектируются и строятся таким образом, чтобы водная растительность характерная для искусственных плавней более эффективно осуществляла очистку сточных вод, чем природные плавни. Они представляют собой экологический вариант вторичной и третичной очистки коммунальных сточных вод.

В случае коммунальных сточных вод фитофильтры могут следовать и за традиционными процессами очистки в качестве завершающей/дополнительной ступени очистки. Различные типы фитофильтров могут эффективно очищать сточные воды на первичной, вторичной или третичной ступенях. Более того, фитофильтры могут быть предусмотрены в одну, две и более ступеней что может увеличить как степень очистки, так и надежность эксплуатации очистных сооружений.

В зависимости от конфигурации и рельефа местности где расположены фитофильтры может применяться или отсутствовать перекачка сточных вод насосами. Как уже было отмечено, фитофильтры могут предусматриваться для вторичной либо третичной очистки, после предварительной ступени механической очистки в септиках или других установках комбинированного первичного отстаивания – сбраживания сырого осадка, а также после модульных компактных установок интенсивной/искусственной биологической очистки.

Технологическая схема очистных сооружений в составе фитофильтров (рис. 2) должна включать грубую механическую предочистку, состоящую из решеток с тонкими прозорами и жиросепараторов. В схему необходимо включить приемный уравнивающий резервуар расходов и концентраций загрязнений ввиду их больших колебаний в широком диапазоне в течение дня, а также в случае периодической/прерывистой подачи очищаемых сточных вод на фильтры. При применении очистки в вертикальных фитофильтрах в технологической схеме могут отсутствовать первичные отстойники.

Удаление биоразлагаемых органических загрязнений представленных в коллоидной и растворенной формах предусматривается путем естественной биологической очистки в фитофильтрах одновременно с частичным удалением бактериологических загрязнений (патогенных микроорганизмов и яиц гельминтов).

Основное различие между естественной и искусственной биологической очисткой состоит в отсутствии в первой образования биологического ила и необходимости его обработки.



Рис.2. Технологическая схема экстенсивной биологической очистки сточных вод в фитофильтрах (фильтрах, засаженных макрофитами)

Вторичная биологическая очистка с фитофильтрами может состоять из одной или нескольких карт расположенных как параллельно, так и последовательно, то-есть в одну или несколько ступеней. Ступени, в свою очередь, могут быть составлены как из одноименных, так и из разных типов фитофильтров (горизонтальных и /или вертикальных), в последнем случае они носят название “гибридных” сооружений (рис. 3).

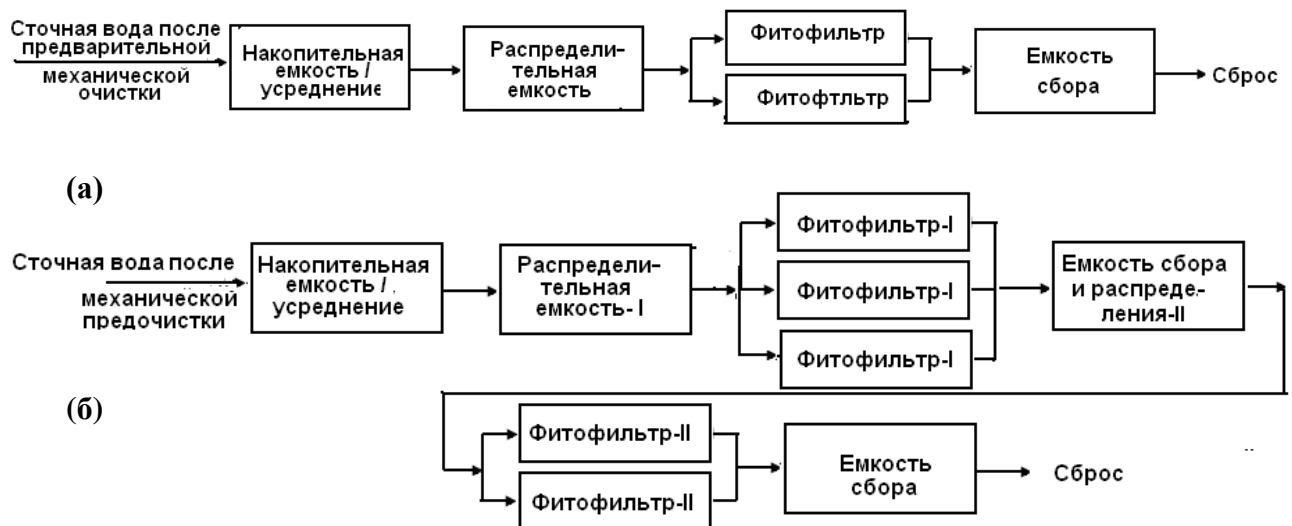


Рис.3. Технологическая схема естественной/экстенсивной биологической очистки сточных вод в фитофильтрах (а) с одной ступенью очистки, (б) с двумя ступенями очистки

Вертикальные фитофильтры, устройство и работа

Очистные сооружения с фитофильтрами с вертикальным направлением движения очищаемой сточной воды, как правило, включают две последовательные ступени, каждая из которых состоит из двух или трех параллельных фильтров, работающих поочередно (возвращаясь в работу по очереди). Целью такого чередования является предотвращение заиливания фильтров, так как во время перерывов достигается минерализация накопившихся органических веществ. Длительность перерыва для первой ступени примерно в два раза превышает время работы/подачи сточных вод, что делает необходимым предусматривать три параллельных карты. Для

второй ступени время работы и перерыва примерно одинаковы и поэтому можно предусмотреть две параллельные карты (рис. 3). Чередование/оборот фильтров, как правило, производится каждые 3-4 дня. Фильтры первой ступени загружаются исключительно галькой/гравием, в фильтрующем слое которых процессы аэрации путем диффузии из атмосферного воздуха являются более интенсивными, чем в слое песка.

Таким образом, периодическое и чередующееся питание вертикальных фитофильтров улучшает эффективность очистки и способствует продлению гидравлической проницаемости фильтрующего материала.

Фитофильтры с вертикальным потоком питаются с поверхности путем равномерного распределения по всей площади и сточная вода стекает, просачиваясь через фильтрующий слой. Первоначально вода подвергается фильтрации, в результате чего происходит физическое задержание взвешенных веществ на поверхности фильтров с образованием слоя осадка. Биологическое разложение растворенных органических загрязнений происходит в ненасыщенном фильтрующем слое с помощью микробной биомассы прикрепленной на твердой подложке, а также на слое осадка отложившегося/аккумулированного в поверхностном слое фильтров. В первой ступени происходит в основном снижение БПК и частичная нитрификация. Вторая ступень завершает удаление БПК и дополняет нитрификацию в той степени в которой условия насыщения кислородом (оксигенация), температура и pH это позволяют.

Растворение/снабжение кислородом процесса аэробной очистки (оксигенация) обеспечивается при периодическом затоплении благодаря явлению конвекции при движении воды сквозь фильтрующий слой и диффузии газов из атмосферы через соприкасающуюся с воздухом поверхность когда поры слоя пусты/свободны от воды. Помимо этого, важную роль в оксигенации фильтрующей загрузки путем диффузии играют дренажные трубопроводы находящиеся в контакте с атмосферой благодаря системе вентиляции (рис. 1а). Аэробные условия, доминирующие в вертикальных фитофильтрах, не способствуют денитрификации. Дефосфатирование также не достигается в полной мере как из-за слабой абсорбционной способности фильтрующего материала (он является кремнистым), так и вследствие невысокой степени его ассимиляции растениями, учитывая применяемые нагрузки. Обеззараживание/дезинфекция также является недостаточной из-за небольшого времени пребывания сточной воды в фитофильтрах с вертикальным потоком.

Избежание заиливания фильтрующего слоя из-за избыточного роста бактериальной биомассы обеспечивается ее автоокислением в течении фазы перерыва в питании водой вертикальных фитофильтров.

Роль макрофитов, в основном тростника, в вертикальных фитофильтрах первой ступени является преимущественно механической. В них происходит развитие густой массы ствол/стеблей, произрастающих из узелков корневищ (подземные стебли), которые пронизывают слой ила

образованного на поверхности фильтров. Стебли и корневища создают пути/каналы которые продлеваются до дренажного слоя фильтров, благодаря чему не происходит заиливания фильтров даже в случае подачи на фильтры неочищенной сточной воды, без предварительного отстаивания.

В осадке накопившемся на поверхности вертикальных фитофильтров развивается микробная биомасса которая способствует минерализации органической составляющей осадка примерно на 65%. В результате образуется слой стабилизированного осадка толщиной около 15 мм в год, который представляет собой своеобразный биофильтр, сохраняющий хорошую фильтруемость. Очищающее действие такого слоя осадка дополняет действие основного фильтрующего слоя, создавая в фитофильтрах тенденцию повышения эффективности очистки по мере их «старения».

Горизонтальные фитофильтры, устройство и работа

Фитофильтры с горизонтальным потоком питаются сточной водой, как правило, непрерывно и характеризуются полностью насыщенным водой фильтрующим слоем благодаря сифонной системе расположенной на выходе/при сбросе очищенной воды, что позволяет, кроме того, регулировать высоту водного слоя в фильтре. Структуры в виде габионов, расположенных на входе и выходе из фильтров, позволяют осуществлять равномерное распределение исходной сточной воды и сбор очищенной воды по всему поперечному сечению фитофильтров (рис. 1 б). Такой тип фитофильтров более чувствителен в отношении заиливания, чем вертикальные фильтры, и поэтому они должны питаться сточной водой из которой предварительно удалены взвешенные вещества или прошедшей первую ступень очистки в вертикальных фитофильтрах.

Снабжение аэробных процессов протекающих в горизонтальных фитофильтрах происходит в основном кислородом, выделяемым корневой системой растений – макрофитов, и, в небольшой степени, путем диффузии газов из атмосферы в верхнюю ненасыщенную часть фильтрующего слоя, соприкасающуюся со слоем воды. Поэтому вклад кислорода, приходящегося на единицу поверхности горизонтальных фитофильтров намного меньше такового в вертикальных фитофильтрах и, следовательно, их поверхность должна устанавливаться и изменяться в зависимости от поставленных задач и целей их использования, учитывая также степень очистки сточной воды в предшествующих сооружениях.

Сравнительно небольшой вклад кислорода в горизонтальных фитофильтрах сдерживает прохождение аэробных процессов и, соответственно, развитие аэробных гетеро- и автотрофных бактерий и, как следствие, ограничивает степень удаления БПК и особенно окисления соединений азота. Поэтому фитофильтры с горизонтальным потоком рекомендуется преимущественно в качестве второй ступени, после вертикальных фитофильтров.

Роль макрофитов

Макрофиты, помимо эстетического вида и механической роли, косвенно способствуют разложению органических загрязнений, содержащихся в неочищенной сточной воде: рост / развитие корней и корневищ позволяет поддерживать или регулировать исходную гидравлическую проводимость фильтрующего слоя фитофильтров; кислород, вводимый благодаря фотосинтезу в растениях, переносится к верхушкам корней, обеспечивая аэробную среду в соседних зонах; рост корневой системы увеличивает площадь как прикрепления развивающихся микроорганизмов (биопленки), так и реакций осаждения; ткань корней и их экссудат представляют ниши, удобные для передвижения микроорганизмов, это явление связано с хорошо известной в агрономии концепции под названием "ризосфера"; метаболизм растений связан с поглощением питательных веществ, влияющих на очистку в зависимости от поверхности; лиственный покров защищает воздушную поверхность от высыхания в летнее время, влияя таким образом, посредством развивающихся бактерий, на минерализацию органического вещества; суммарное испарение летом приводит к существенному снижению расхода очищенной сточной воды выпускаемой / сбрасываемой в водоем-приемник; в зимний период опавший лиственный покров снижает отрицательное воздействие низких температур в холодное время года.

Благодаря корневой системе макрофитов, в более общем плане фильтровальная среда фитофильтров обладает более широким спектром видов (бактерии, простейшие, беспозвоночные), активность которых зависит от нагрузки сточных вод и условий снабжения кислородом. Все эти микроорганизмы также участвуют в качестве конкурентов и потребителей при снижении патогенной популяции, но это снижение также зависит и от времени пребывания сточной воды в теле фитофильтров.

Проектирование фитофильтров. Наиболее распространенным способом определения размеров фитофильтров в международной практике является применение нормативной удельной площади, приходящейся на условного жителя. Основные величины удельной площади рекомендуемые в специальной литературе для **фитофильтров с вертикальным потоком:**

- для определения общей полезной площади – 2...2,5 м²/жителя;
- для определения площади первой ступени – 1,2...1,5 м²/жителя;
- для определения площади второй ступени – 0,8...1,0 м²/жителя.

Указанные величины применимы для постоянно проживающего населения.

Они установлены таким образом, чтобы необходимая степень очистки достигалась и в зимнее время, менее благоприятное для биологических процессов очистки сточных вод. Достигаемая в летнее время степень очистки показывает что фитофильтры способны выдержать более высокие нагрузки и при этом удельная площадь может быть снижена до 1 м²/жителя.

Площадь поверхности **фитофильтров с горизонтальным потоком** зависит от концентрации загрязнений в очищаемой воде. Рекомендуемые удельные площади для двух типов предочистки следующие:

- при использовании для предочистки отстойников – сбраживателей – 5 м²/жителя;
- при использовании в качестве первой ступени вертикальных фитофильтров – 2...3 м²/жителя.

Для равномерного распределения исходных сточных вод с содержанием взвешенных веществ (в отсутствии первичных отстойников) по поверхности **вертикальных фитофильтров** подача должна производиться с расходом превышающим поступление воды на очистные сооружения. Это требует предусмотрения подачи исходной воды из резервуара-усреднителя с довольно длительным накоплением в нем, за которым следуют короткие периоды затопления фильтров большими расходами воды (0,5...1,5 м³/м².час). При этом затопляемый объем, приходящийся на каждую карту, должен обеспечить слой воды толщиной от 2 до 5 см, распределенный равномерно по поверхности затопляемой им работающей площадки.

Первая ступень фитофильтров с вертикальным потоком проектируется с фильтрующим материалом исключительно из гравия/галки в три слоя крупностью частиц от 3 до 80 мм. Дренажный слой высотой 10...20 см имеет крупность частиц от 20 до 60 мм. Материал верхнего слоя фитофильтров второй ступени составляет песок. Его роль состоит в задержании взвешенных веществ. Если необходима высокая степень нитрификации может быть предусмотрен дополнительный слой мелкой галки с размером частиц от 2 до 8 мм.

Для сбора очищенной сточной воды в дренажном слое предусматриваются дренажи из перфорированных труб диаметром не менее 100 мм. Концы дренажной системы должны быть соединены с атмосферным воздухом.

Удаление осадка с поверхности вертикальных фитофильтров первой ступени предусматривается с периодичностью около одного раза в 10...15 лет. Такой осадок хорошо стабилизирован и не подвергается более сбраживанию.

В случае **фитофильтров с горизонтальным потоком** для обеспечения непрерывного равномерного поступления исходной сточной воды должны быть предусмотрены распределительные устройства в виде желобов с водосливной стенкой со строго горизонтальной кромкой или перфорированных трубопроводов, по всей ширине фильтра. Проектирование геометрии площадок/карт фитофильтров должно основываться на гидравлической проницаемости фильтрующего материала через который сточная вода проходит по горизонтали вдоль фильтра, в соответствии с законом Дарси. Если фитофильтры питаются отстойной сточной водой рекомендуется использовать фильтрующий материал с крупностью частиц от 4 до 8 мм. Для фитофильтров расположенных после вертикальных

фитофильтров можно использовать более мелкие частицы – от 1 до 4 мм. Устройство выпуска очищенных сточных вод должно обеспечить сохранение уровня воды в фильтрующем слое по меньшей мере на 5 см ниже световой поверхности загрузки. Дренаж диаметром 100 мм предусмотрен для сбора очищенной воды в выпускном габионе. Устройство выпуска может быть снабжено трубопроводом с поворотным коленом или гибким шлангом с верхним концом установленным на регулируемой высоте.

Заключение

В соответствии с опытом накопленным в течение 1980-2014 годов в различных странах ЕС, правильно спроектированные и построенные фитофильтры обеспечивают соблюдение требований Директивы ЕС об очистке городских сточных вод в отношении удаления взвешенных веществ (ВВ) и органических загрязнений (ХПК и БПК), при этом данные показатели указывают степень очистки более 80-90%, в зимний и летний период, соответственно.

Что касается очистки от биогенных элементов (N и P) фитофильтры с одной ступенью обеспечивают только частичное снижение этих элементов, а патогенные бактерии снижаются на 1-3 log.

Более высокую степень биологической очистки, по данным специальной литературы, обеспечивают фитофильтры в две ступени: а) в фильтрах с вертикальным потоком – «французская» система или б) «гибридная» система – на первой ступени вертикальные и на второй – горизонтальные фитофильтры. Такая технология может обеспечить нитри – денитрификацию, а для удаления фосфора и достаточной дезинфекции сточной воды необходима более глубокая очистка путем химического дефосфатирования и специальная дезинфекция в прудах отстаивания или УФ – облучением.

Список литературы

1. *Свод Правил* СР G 03.01: 2016. Системы биологической очистки сточных вод в почвенно-растительных фильтрах (фитофильтрах). МРРС, Кишинев, 2016. 45 с.
2. *ONORM B 2505* (2009) –Subsurface flow constructed wetlands – applications, design, construction and operation. Vienna, Austria. 22 p.
3. *Kadlec R.K., Wallace S.D.* Treatment wetlands, Second edition. CRC press, Taylor and Francis Group, New York, 2009. 965 p.
4. *Code of good practices. Constructed wetlands* (CEE Project, Flemish Government HON/002/07). Deun R.V., Dyck M.V., Geel, Belgium, 2010. 56 p.
5. *Mazoni M.* Linee guida per la progettazione e gestione di zone umide artificiali per la depurazione dei reflui civili. Arpat, Firenze, 2005. 88 p.
6. *Vymazal J.* Constructed wetlands for wastewater treatment. Five decades of experience. Environmental Science and Technology, 2011, 45: P.61-69.
7. *UN-HABITAT.* Constructed wetlands manual. 2008.102 p.

Надійшло до редакції 22.11.2016