

БИОРЕМЕДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА С УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Евстигнеева Ю.В., Трофименко Ю.В., Евстигнеева Н.А.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, e-mail: y.evst_tb@mail.ru*

Рассмотрены рекомендуемые отраслевым дорожным методическим документом ОДМ 218.8.005-2014 типы локальных очистных сооружений на автомобильных дорогах различных категорий. Указаны причины, по которым их применение на улично-дорожной сети населенных пунктов нецелесообразно. Определены требования, которым должны соответствовать локальные очистные сооружения на автомобильных дорогах. Изучение ряда зарубежных и отечественных публикаций позволило выявить перспективные технологии очистки поверхностных сточных вод с улично-дорожной сети населенных пунктов. Это технологии, основанные на биоремедиации, то есть на использовании метаболического потенциала биологических объектов (растений, микроорганизмов и других организмов). Основанные на этих технологиях локальные очистные сооружения для очистки поверхностных стоков с улично-дорожной сети населенных пунктов уже нашли применение во многих странах – США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, Китае, ряде европейских стран. Рассмотрены основные типы локальных очистных сооружений, основанных на биоремедиационных технологиях, которые применяют на улично-дорожной сети населенных пунктов. Приведена сравнительная оценка эффективности очистки поверхностных сточных вод на рассмотренных типах локальных очистных сооружений. Показаны проблемы, возникающие при эксплуатации локальных очистных сооружений в умеренном климате, и пути их решения.

Ключевые слова: автомобильная дорога, поверхностные сточные воды, биоремедиация, биофильтрационный склон, биодренажная канава, дождевой сад

BIOREMEDIATION TECHNOLOGIES FOR RUNOFF TREATING FROM THE ROAD NETWORK OF SETTLEMENTS

Evstigneeva Yu.V., Trofimenko Y.V., Evstigneeva N.A.

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow,
e-mail: y.evst_tb@mail.ru*

In the article the types of on-site runoff treatment plants on roads of various categories, recommended by the industry road guidance document (ODM 218.8.005-2014), are considered. The reasons of impractical use of these treatment plants on the road network of settlements are indicated. The requirements for on-site treatment plants on roads are defined. Foreign and domestic publications are studied. This made it possible to identify promising surface runoff treatment technologies from the road network of settlements. These technologies are based on bioremediation, namely on using of metabolic resources of biological objects (plants, microorganisms and other organisms). With the help of such technologies in on-site treatment plants for surface runoff treatment from the road network of settlements are used in many countries – the USA, Canada, Australia, New Zealand, China, some European countries. The main types of on-site treatment plants, based on bioremediation technologies, which are used on the road network of settlements, are considered. A comparative assessment of the efficiency of surface runoff treatment plants in the studied types of on-site treatment plants is given in the article. The problems arising from the exploitation of on-site treatment plants in temperate climate and ways how to solve them are shown.

Keywords: road, surface runoff, bioremediation, filter strip, bioswale, rain garden

Эксплуатация автомобильных дорог наряду с позитивным социально-экономическим эффектом сопровождается негативным воздействием на компоненты окружающей среды: атмосферный воздух, водные объекты, почвенный покров и грунты. Одним из значимых источников загрязнения поверхностных и подземных вод, а также почв является поверхностный сток с дорожного полотна автомобильных дорог [1, с. 30], содержащий загрязняющие вещества в концентрациях, значительно превышающих предельно допустимых концентрации, установленные для вод водных объектов (табл. 1).

С целью минимизации негативного воздействия автомобильной дороги

на поверхностные и подземные воды, а также земельные ресурсы и почвенный покров в российских нормативных правовых актах (обязательных к исполнению) и отраслевых дорожных методических документах (имеющих рекомендательный характер) для предотвращения сбросов неочищенных или недостаточно очищенных вод показано устройство очистных сооружений. В Водном кодексе РФ [4, статья 65] особо оговаривается наличие очистных сооружений в границах водоохранных зон. Автомобильные дороги, как и все хозяйственные и иные объекты, расположенные в указанных зонах, должны быть оборудованы сооружениями и системами «для отведения (сброса) сточных вод в централизованные системы

водоотведения ..., если они предназначены для приема таких вод» [Там же] либо локальными очистными сооружениями (далее – ЛОС), обеспечивающими очистку сточных вод, исходя из наиболее жестких нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (см. табл. 1). Поскольку поверхностные сточные воды имеют характерные особенности, «отличающие их от других категорий сточных вод (периодичность поступления, значительные колебания качественного и количественного состава, одновременное присутствие широкого спектра загрязняющих веществ)» [5, с. 17], то их непосредственное отведение в централизованные системы для последующей очистки на традиционных очистных сооружениях круглогодичного действия является нецелесообразным (даже при их наличии). ОДМ 218.8.005-2014 [6, с. 4] рекомендует поверхностные стоки с территорий автомобильных дорог в пределах водоохранных зон подвергать очистке на ЛОС, максимально приближенных к источникам загрязнения. Выбор технологической схемы очистки, а также конструкции ЛОС зависит от качественной и количественной характеристики сточных вод. В табл. 2 представлены ЛОС, рекомен-

дуемые ОДМ 218.8.005-2014 [6, с. 19–78] для сооружения на автомобильных дорогах в зависимости от категории последних.

С одной стороны, эти рекомендации могут быть распространены и на улично-дорожную сеть (далее – УДС) городов и других населенных пунктов, если воспользоваться наиболее часто применяемым соответствием категорий автомобильных дорог, переходящих в УДС на территории населенных пунктов (табл. 3).

С другой стороны, есть целый ряд возражений по их применению на УДС населенных пунктов. Во-первых, практически все рекомендуемые ЛОС требуют достаточных свободных площадей для размещения, а их внешнее оформление не гармонирует с архитектурной средой поселений (рис. 1). Во-вторых, на некоторых возводимых на автомобильных дорогах ЛОС (рис. 1, г – е) применяют высшую водную растительность (далее – ВВР), высаженную в естественный или искусственный водоем для обеспечения условий ее произрастания. Однако «постоянное присутствие застойной воды в зарослях ВВР может способствовать [появлению неприятных запахов и] бурному развитию насекомых (комаров, мошек и т.д.), что недопустимо в условиях городской среды» [8, с. 127].

Таблица 1

Концентрации некоторых веществ в поверхностном стоке с автомобильных дорог, мг/дм³ (по данным российских исследований) [2, с. 23; 3]

Загрязняющие вещества	Дождевой сток		Талый сток		ПДК _{хл,кб} ¹⁾	ПДК _{рх} ²⁾
	диапазон	среднее	диапазон	среднее		
Взвешенные вещества	174...2700	1437	1400...3000	2900	3)	4)
Нефтепродукты	0,74...30	15,3	10...60	35	0,3	0,05
Свинец	0,28...0,3	0,29	0,28...0,31	0,3	0,01	0,006/0,01
Цинк	0,3...0,7	0,5	0,6...0,8	0,7	1	0,01/0,05
Медь	0,01...0,1	0,055	0,01...0,1	0,055	1,0	0,001/0,05

Примечания к табл. 1.

¹⁾ Приведены ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по ГН 2.1.5.1315-03, за исключением ПДК взвешенных веществ.

²⁾ Приведены ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, утвержденные Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552, для металлов в знаменателе приведены ПДК для морской воды.

³⁾ Согласно СанПиН 2.1.5.980-00 при сбросе сточных вод в водный объект содержание взвешенных веществ в его контрольном створе (пункте) не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на 0,25 мг/дм³ – для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения и более чем на 0,75 мг/дм³ – для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест. Для водных объектов, содержащих в межень более 30 мг/дм³ природных взвешенных веществ, допускается увеличение их содержания в воде в пределах 5%.

⁴⁾ При сбросе сточных вод содержание взвешенных веществ в контрольном створе (пункте) водных объектов рыбохозяйственного значения не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на 0,25 мг/дм³ – для водных объектов высшей и первой категорий; более чем 0,75 мг/дм³ – для водных объектов второй категории.

В-третьих, анализ отечественных публикаций, выполненный в [1], позволил выявить «низкую эффективность введенных в действие на автомобильных дорогах локальных очистных сооружений, предназначенных для очистки поверхностных стоков» [Там же, С. 30], в силу следующих причин:

- ошибок в проектировании и строительстве;
- нарушений обслуживающим персоналом технической эксплуатации;
- несоблюдения сроков планово-предупредительного ремонта.

Цель исследования: изучение зарубежного и отечественного опыта в части при-

менения для очистки поверхностных стоков с автомобильных дорог ЛОС, отвечающих следующим требованиям:

- экологичность строительства и эксплуатации;
- высокая эффективность очистки стоков в теплый и холодный периоды года;
- экономичность (низкая стоимость) строительства и эксплуатации;
- простота содержания сооружения, не требующая высокой квалификации обслуживающего персонала;
- органичность и гармоническая связь с урбанизированным ландшафтом.

Таблица 2

Рекомендуемые локальные очистные сооружения (ЛОС) на автомобильных дорогах
[Приводится по: 7, с. 81]

Вид ЛОС	Применяемые методы очистки	Категория автомобильных дорог
Простейшие	Механические	III и ниже
Пруды отстойники каскадного типа:	Механические, физико-химические, биологические	
1 или 2-х каскадные		III – IV
2-х и более каскадные		I – II
Гидробиотические площадки	Механические, физико-химические, биологические	III и выше
Сборные сооружения модульного типа	Механические, физико-химические	I – IV
Очистные сооружения индивидуального проектирования из сборного и монолитного железобетона	Механические, физико-химические	I
Модульные станции полной заводской готовности	Механические, физико-химические	I – IV
Очистные сооружения индивидуального проектирования кассетного типа (применяются на мостовых сооружениях)	Механические, физико-химические	I – II
Фильтрующий патрон (для очистки поверхностных стоков с мостов)	Механические, физико-химические	I – III

Таблица 3

Соответствие категорий автомобильных дорог, переходящих в УДС на территории населенных пунктов [7, с. 81–82]

Класс, категория автомобильной дороги	Категория дорог и улиц населённого пункта	
Автомобильная (А)	Городская автомобильная (магистральная городская дорога 1 класса с расчётной скоростью 130 км/ч)	
Скоростная автомобильная дорога (Б)	Городская скоростная автомобильная дорога (магистральная городская дорога 1 класса с расчётной скоростью 110 или 90 км/ч)	
Обычные автомобильные дороги	IV	Магистральная улица общегородского значения 1 класса
		Магистральная городская дорога 2 класса
	II	Магистральная улица общегородского значения 1 класса
		Магистральная улица общегородского значения 2 класса
	III	Магистральная улица общегородского значения 3 класса
		Магистральная улица районного значения
	IV	Улицы и дороги местного значения
		Основные улицы сельского поселения
	V	Улицы и дороги местного значения
		Местные улицы и дороги сельского поселения

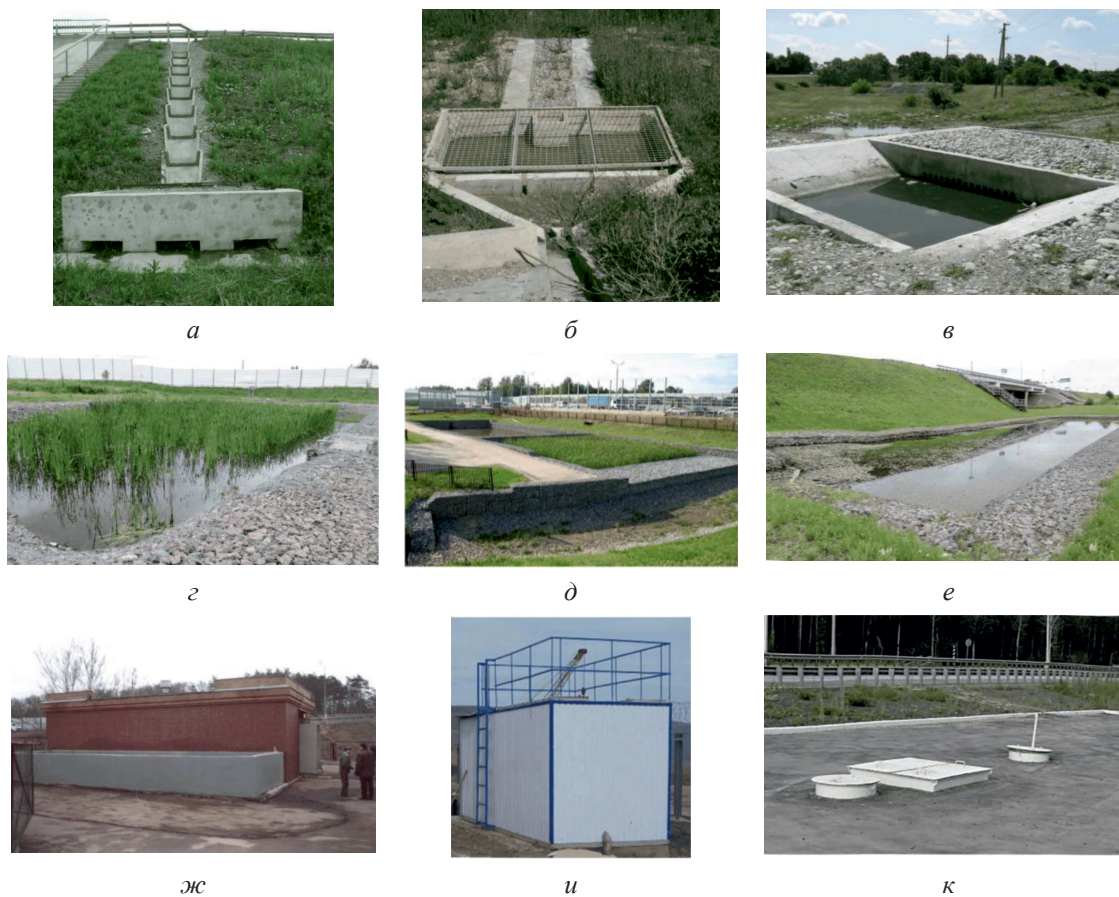


Рис. 1. Некоторые типы ЛОС, применяемые на автомобильных дорогах [6]: а – простейшее очистное сооружение со щебеночной загрузкой; б – простейшее очистное сооружение с отстойником и щебеночной загрузкой (вид сверху); в – простейшее очистное сооружение с отстойником и щебеночной загрузкой (вид сбоку); г – пруд, засаженный высшей водной растительностью; д – пруд-отстойник каскадного типа с использованием габионов; е – гидроботаническая площадка с устройством плавающих бонов из сорбирующего нефтепродукты материала; ж – общий вид очистного сооружения индивидуального проектирования; и – общий вид модульной станции глубокой очистки наземного расположения; к – общий вид станции глубокой очистки подземного расположения

Материалы и методы исследования

Для исследования был осуществлен подбор публикаций по заявленной теме, находящихся в открытом доступе; а также соответствующих российских нормативных правовых актов и директив по управлению поверхностным стоком, действующих в ряде зарубежных стран. На основе изучения источников выполнен анализ существующих и перспективных ЛОС для очистки поверхностных стоков с автомобильных дорог.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что заявленным требованиям наиболее полно отвечают ЛОС, в которых

использованы технологии биоремедиации, основанные на метаболическом потенциале биологических объектов – высших растений и микроорганизмов. Для населенных пунктов могут быть рекомендованы три основных типа сооружений: биодренажная канава, биофильтрационный склон, дождевой сад, используемые для водоотвода и очистки поверхностных стоков с УДС.

Биодренажная канава (рис. 2, а) представляет собой траншею небольшой глубины (до 1 м [5, с. 78]) с плотной посадкой растительности, имеющую небольшой продольный уклон для обеспечения стока поверхностных воды самотеком (оптимальный уклон – 2...3% [9, с. 66]) и пологий уклон откоса (не более 1 : 2...1 : 4 [9, с. 66; 10, с. 4.62; 11, с. 13]). Ширина основания

не должна быть более 2 м для предотвращения концентрации (сосредоточения) стока, но должна быть достаточной для облегчения скашивания растительности [10, с. 4.62]. Минимальная длина канавы – 30 м [10, с. 4.61]. Размещать данное ЛОС следует на открытой местности, избегая затенения – для стимулирования роста растительности; площадь водосбора не должна превышать 4 га [10, с. 4.61]. Сточные воды после очистки отводятся либо непосредственно по канаве, либо по дренажной трубе, которая прокладывается под ней.

Следует отметить, что в соответствии с требованиями СП 32.13330.2012 отведение поверхностных стоков по открытым канавам допускается лишь «для селитебных территорий с малоэтажной индивидуальной застройкой, поселков в сельской местности, а также парковых территорий с устройством мостов и труб на пересечениях с дорогами» [12, п. 7.1.10].

Биофильтрационный склон представляет собой ровную площадку с плотной высадкой газонной травы, имеющую незначительный продольный уклон (порядка 1 % [13, с. 42]). Максимальная длина склона – 50 м [10, с. 4.61]. Требования к месту размещения и к площади водосбора аналогичны требованиям для биодренажных канав. Зачастую биофильтрационные склоны применяют не самостоятельно, а как первую (предварительную) ступень очистки перед другими ЛОС.

Дождевой сад представляет собой понижение рельефа, запроектированное для приема поверхностного стока, и засыпанное фильтрующей загрузкой (мощность слоя 0,5...1,0 м), в которую высажены влаголюбивые высшие растения с мощной корневой

системой. Площадь водосбора – не более 0,1 га [10, с. 4.61]. Рекомендуемая глубина зоны накопления сточных вод 0,1...0,3 м [9, с. 70; 10, с. 4.61]. Поступивший сток по санитарно-гигиеническим соображениям не должен находиться в зоне накопления сада свыше 24 ч. Поверхностные воды проходят через фильтрующую загрузку и либо инфильтруются в естественный грунт, либо отводятся по дренажной системе. Максимальное время прохождения поступившего объема стока через дождевой сад, включая зону накопления, – 72 ч [9, с. 70].

Сравнительная оценка эффективности рассмотренных сооружений, определяемая процессами, происходящими в ЛОС, и их интенсивностью, а также временем нахождения очищаемых вод в сооружениях, представлена в табл. 4.

Результаты выполненного исследования позволяют рекомендовать для использования на УДС населенных пунктов в качестве ЛОС дождевые сады. Однако эффективность их эксплуатации в условиях холодного климата затруднена по ряду причин: низких температур, промерзания грунта, короткого теплого периода года, обилия выпадающего снега [13, с. 47]. В связи с этим особую актуальность представляют выполненные в Пермском научном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) исследования, в результате которых [5, с. 56–96]:

1) предложен состав фильтрационной загрузки, позволяющий использовать дождевые сады в умеренном климатическом поясе как в теплый, так и в холодный периоды года:

- 10...20 % (об.) низинного торфа;
- 20...40 % (об.) природного цеолита;
- 50...70 % (об.) песка мелкого строительного.



а



б

Рис. 2. Внешний вид ЛОС, в которых используются технологии биоремедиации: а – биодренажная канава [9, с. 69]; б – дождевой сад [Приводится по: 7, с. 89]

Таблица 4

Эффективность очистки на ЛОС с использованием биоремедиационных технологий [13, с. 46]

Сооружение	Эффективность удаления загрязняющих веществ и микроорганизмов					
	Взвешенные вещества	Биогенные элементы (N, P)	Тяжелые металлы	Нефте-продукты	Органические вещества	Бактерии
Биофильтрационные склоны	■	□	■	■	■	□
Биодренажные канавы	■	□	■	■	■	□
Дождевые сады	■	■	■	■	■	■

■ – высокая (~70...100%);

■ – средняя (~40...70%);

□ – низкая (~10...40%)



а

б

Рис. 3. Растения, рекомендованные для применения в дождевых садах умеренного климата [Приводится по: 7, с. 110]: а) ирис болотный; б) тростник обыкновенный

Введение в загрузку торфа и цеолита, обладающих сорбционными и ионообменными свойствами, позволяет использовать дождевой сад при околонулевых температурах. В лабораторном эксперименте показано, что при понижении температуры с +20°C до +2°C эффективность очистки от тяжелых металлов уменьшается лишь на 4,8...9,6%, а эффективность очистки от нефтепродуктов, наоборот, увеличивается на 24%;

2) экспериментально доказана перспективность фиторегенерации фильтрующей загрузки при использовании ириса болотного и тростника обыкновенного (рис. 3) – за счет частичного извлечения тяжелых металлов и нефтепродуктов из загрузки растениями и почвенными микроорганизмами (корневая система растений способствует развитию ризосферной биоты), а также за счет восстановления пропускной способности загрузки под действием процессов развития корневой системы растений. Следует отметить, что

отбор растений для изучения перспективности их применения в ЛОС проводился исследователями по следующим критериям: распространенность в умеренных широтах, влаголюбивость, мощность корневой системы, зимостойкость, неприхотливость в уходе.

Очевидно, что для увеличения эффективности очистки сточных вод и регенерации фильтрующей загрузки в дождевых садах целесообразно использовать консорциумы активных штаммов микроорганизмов-деструкторов. Наиболее перспективно комбинированное использование растений и ризосферных микроорганизмов (растительно-ризомикробных комплексов), однако подбор оптимальных (симбиотических) их сочетаний требует самостоятельного исследования.

Выводы

1. Обоснована актуальность разработки конструкций локальных очистных сооружений с использованием биоремедиационных

технологий для обработки поверхностного стока с УДС населенных пунктов.

2. Рассмотрены основные типы ЛОС с использованием биоремедиационных технологий для очистки поверхностных сточных вод.

3. Показана перспективность применения на улично-дорожной сети населенных пунктов для очистки поверхностных сточных вод дождевых садов.

4. Предложено для увеличения эффективности очистки сточных вод и регенерации фильтрующей загрузки использовать в дождевых садах растительно-ризомикробные комплексы.

Список литературы

1. Евстигнеева Ю.В., Евстигнеева Н.А. Актуальность задачи очистки поверхностного стока с дорожного полотна автомобильных дорог // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 2-3. С. 26–30.
2. Касаткин А.В. Разработка метода очистки поверхностного стока с проезжей части автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11; 05.23.04 / МАДИ (ГТУ). М., 2007. 150 с.
3. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155/ (дата обращения: 30.01.2020).
4. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 02.08.2019). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения: 30.01.2020).
5. Щукин И.С. Очистка поверхностных сточных вод с применением фитофильтров: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Пермский нац. исслед. политехн. ун-т. Пермь, 2019. 177 с.
6. ОМД 218.8.005-2014. Методические рекомендации (указания) по содержанию очистных сооружений на автомобильных дорогах / Росавтодор. М., 2014. 97 с.
7. Методические рекомендации по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации: отчет о НИР (заключ.) / ЗАО «ПРОМТРАНСИИПРОЕКТ»; рук. Немчинов Д.М.; исполн.: Трофименко Ю.В., Евстигнеева Н.А., Лобиков А.В., Муравьев А.В., Царьков И.С. М., 2019. 181 с.
8. Мелехин А.Г., Щукин И.С. Применение биоинженерных сооружений для очистки ливневых и талых вод с урбанизированных территорий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 122–132.
9. Stormwater Retrofit Guidance Manual. Philadelphia Water Department. URL: <https://www.phila.gov/water/PDF/SWRetroManual.pdf> (дата обращения: 31.05.2019).
10. On-site stormwater devices: description and standard design steps/ On-Site Stormwater Management Guideline. New Zealand Water Environment Research Foundation. Wellington, New Zealand. October 2004. URL: <https://ru.scribd.com/document/73716305/New-Zealand-On-Site-Stormwater-Management-Guideline-Water-Environment-Research-Foundation> (дата обращения: 29.01.2020).
11. Stormwater Guideline. ERB 322/ Water Security Agency. January 2014. URL: <http://www.saskh20.ca/DWBinder/epb322.pdf> (дата обращения: 29.01.2020).
12. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с изменениями № 1, 2). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094155> (дата обращения: 29.01.2020).
13. Мелехин А.Г., Щукин И.С. Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала// Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 40–50.