

Биоинженерные сооружения как элемент управления
поверхностным стоком городских территорий

Юлия Александровна Рыльцева

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В средствах массовой информации регулярно появляется информация о затоплениях улиц городов, являющихся следствием климатических изменений, несоответствия пропускной способности систем водоотведения возникающим расходам дождевого стока или полного их отсутствия. Предмет исследования — процессы управления поверхностным стоком: сбор, регулирование отведения в централизованные системы канализации, очистка и возврат в водные объекты. Цель исследования состоит в оптимизации процессов обращения с поверхностным стоком в условиях городской среды посредством устройства биоинженерных сооружений.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор нормативных документов, результатов научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок (отечественных и зарубежных) по проблеме управления поверхностным стоком, формирующимся в условиях городской среды. Проанализированы сведения об эффективности очистки стока на биоинженерных сооружениях с целью оценки возможности выпуска очищенного стока в водные объекты.

Результаты. Косновным типам биоинженерных сооружений для управления поверхностным стоком относят: дождевые сады, озелененные кровли, гидроботанические площадки, биодренажные каналы. Объем вмещаемого стока такими сооружениями зависит от толщины почвогрунта, его состава, наличия или отсутствия дренажа. Эффективность очистки поверхностного стока в биоинженерных сооружениях по взвешенным веществам может составлять от 70 до 100 %, эффективность снижения показателей БПК — от 67 до 98 %, ХПК — от 70 до 92 %, нефтепродуктов — от 40 до 100 %. Задействование поверхностного стока для непитьевого водоснабжения города позволяет сократить потребление воды из централизованной системы водоснабжения на 30–60 %.

Выводы. Следует принимать во внимание, что оценка эффективности биоинженерных сооружений в вопросах аккумуляирования и очистки поверхностного стока должна устанавливаться индивидуально для каждого проектного решения для предотвращения негативного воздействия на окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностный сток, дождевой сток, биоинженерные сооружения, очистка поверхностного стока, фитоочистка, дождевой сад, биодренажная канава, гидроботаническая площадка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыльцева Ю. А. Биоинженерные сооружения как элемент управления поверхностным стоком городских территорий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 976–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.976-990

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Рыльцева, ryiltsevayua@mgsu.ru.

Bioengineering structures as an element of surface runoff
management in urban areas

Yuliya A. Ryltseva

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Reports on the flooding of urban streets regularly appear in the mass media. Such flooding is caused by climate change, by the insufficient conveyance capacity of urban drainage systems relative to the stormwater runoff flow rates generated, or by the complete absence of such systems. The subject of the study is surface runoff management, including collection, regulation of discharge to centralized sewerage systems, treatment, and subsequent discharge to receiving water bodies. The aim of the study is to optimize surface runoff management in urban environments through the installation of bioengineering structures.

Materials and methods. The study included an analytical review of regulatory documents and the results of Russian and international research and development activities addressing the management of surface runoff generated in urban environments. Data on the treatment efficiency of bioengineering structures were analyzed to assess the feasibility of discharging treated surface runoff into receiving water bodies.

Results. The main types of bioengineering structures for surface runoff management include rain gardens, vegetated roofs, hydro-botanical sites, bioswales. The amount of runoff depends on the soil thickness, soil composition, and the presence

or absence of drainage. The removal efficiency for BOD ranged from 67 to 98 %, for COD — from 70 to 92 %, and for petroleum hydrocarbons — from 40 to 100 %. Using surface runoff for non-potable urban water supply can reduce demand on centralized water supply systems by 30–60 %.

Conclusions. It should be noted that the performance of bioengineered structures in terms of surface runoff retention and treatment should be assessed individually for each design solution in order to prevent adverse environmental impacts.

KEYWORDS: surface runoff, rain runoff, bioengineering structures, surface runoff treatment, phyto-purification, rain garden, bioswale, hydro-botanical site

FOR CITATION: Ryltseva Yu. A. Bioengineering structures as an element of surface runoff management in urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):976-990. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.976-990 (rus.).

Corresponding author: Yuliya A. Ryltseva, ryltsevayua@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация современных городов неизбежно приводит к снижению водопроницаемости поверхностей их территорий. По данным исследования [1] общая площадь усовершенствованных дорожных покрытий и кровель в мегаполисах может составлять до 80 %, что вызывает образование больших объемов поверхностного стока, требующего организованного отведения. Задерживание стока на улично-дорожной сети (УДС) города может повлечь негативные последствия — наводнения, приводящие (в зависимости от масштаба) к нарушению нормального перемещения по городу автотранспорта и пешеходов, разрушение строительных конструкций инфраструктуры и гибель людей. Росту интенсивности атмосферных осадков способствуют также глобальные климатические изменения [2, 3]. Все чаще возникают ливневые дожди высокой интенсивности, получившие в публицистике название «сверхливни». Климатологи отмечают увеличение интервалов между осадками в умеренных широтах при возрастании их интенсивности и продолжительности выпадения. Особую актуальность управление поверхностным стоком имеет в регионах с муссонным климатом и сложным рельефом (большим перепадом высот), низменные участки которого подвергаются частым затоплениям даже при дождях средней интенсивности [4].

Вместе с тем отдельные регионы России переживают аридизацию климата, на фоне которой наблюдается катастрофическое снижение водности рек, являющихся источниками централизованного водоснабжения [5, 6]. Ярким примером служит Ростовская область, главная водная артерия которой — р. Дон обладает малой водностью с 2007 г. по настоящее время [7]. Не меньшее беспокойство вызывает обмеление Оки [8], Волги [9, 10], отдельные участки которых становятся несудоходными. Ученые сообщают о необходимости в подобной неблагоприятной экологической ситуации грамотного управления поверхностным стоком: его следует собирать и направлять в русла рек, минимизируя фильтрацию в подземные водоносные горизонты, в том числе в условиях недостаточной обеспеченности населенных пунктов системами централизованного отведения поверхностного стока. Для вододефицитных территорий

дождевой сток стоит рассматривать как альтернативный источник водоснабжения.

Все, обозначенное выше, является вызовом для инженеров, создающих системные технологии для управления поверхностным стоком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поступление поверхностного стока в систему водоотведения характеризуется высокой неравномерностью. Преимущественно это относится к дождевому стоку, типовой гидрограф которого определяется быстрым возрастанием расхода в начале дождя до момента максимума, затем снижением расхода: сначала резким, потом медленным до достижения нулевых значений. Высокие значения интенсивности дождя вызывают необходимость обеспечения больших диаметров коллектора водоотведения в конце сети, организации насосных станций и очистных сооружений большой мощности. Избежать перечисленных последствий можно путем регулирования поступления поверхностного стока в водоотводящую сеть.

Проведен аналитический обзор действующей нормативной и методической документации (русской, зарубежной) в сфере обращения с поверхностным стоком. Для выявления лучших практик проанализированы результаты научной деятельности и опытно-конструкторских разработок специалистов в сфере водоотведения и градостроительства. Рассмотрены программные комплексы, применяемые для определения параметров сооружений регулирования и очистки поверхностного стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К стандартным инженерным сооружениям, позволяющим регулировать поступление стока в коллекторы канализации, относят регулирующие резервуары, разделительные камеры, насосные станции. В рекомендациях НИИ ВОДГЕО¹ предлагаются сле-

¹ Мениутин Ю.А., Верещагина Л.М., Керин А.С., Фомичева Е.В., Логунова А.Ю. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты : методическое пособие. М., 2015.

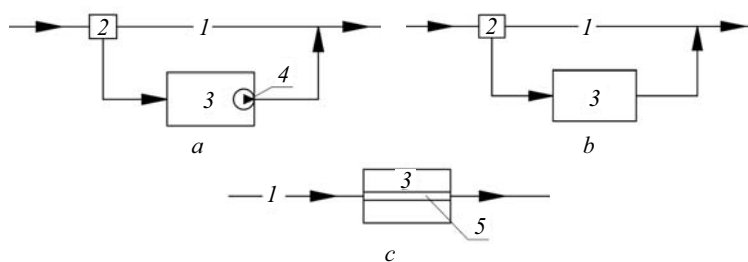


Рис. 1. Схемы регулирования поверхностного стока¹: *a* — схема 1; *b* — схема 2; *c* — схема 3; 1 — водоотводящий коллектор; 2 — разделительная камера; 3 — регулирующий резервуар; 4 — насосная установка; 5 — донный лоток

Fig. 1. Surface runoff control schemes¹: *a* — Scheme 1; *b* — Scheme 2; *c* — Scheme 3; 1 — stormwater collector; 2 — flow-splitting chamber; 3 — storage/control tank; 4 — pumping unit; 5 — bottom channel

дующие схемы регулирования поступления дождевого стока в системы водоотведения с использованием перечисленных сооружений.

Схема 1 (рис. 1, *a*) предполагает наличие на водоотводящем коллекторе разделительной камеры. Ее назначение состоит в отделении части расхода стока (превышающего предельное значение) в регулирующий резервуар. Опорожнение резервуара осуществляется посредством насоса, включающегося при достижении водой предельного уровня. Насос транспортирует сток с заданным постоянным расходом, не превышающим расчетного значения, на которое рассчитаны очистные сооружения.

Схема 2 (рис. 1, *b*) похожа на предыдущую, разница состоит в отсутствии насоса. Опорожнение резервуара производится в самотечном режиме по трубопроводу, диаметр которого не будет способствовать поступлению на очистные сооружения расхода, превышающего расчетное значение. Недостаток такой схемы заключается в необходимости значительного заглубления коллектора для подключения отводящего трубопровода резервуара.

Схема 3 (рис. 1, *c*) подразумевает доставку всего расхода в регулирующий резервуар, по всей длине которого предусмотрен донный лоток, соединяющийся с отводящим трубопроводом. Пропускная способность лотка рассчитывается на расход, не превышающий предельного значения. Избыток расхода задерживается в резервуаре до снижения интенсивности дождя.

Технические параметры элементов схем регулирования 1–3 могут быть рассчитаны по стандартным методикам (Свод правил², Рекомендации НИИ ВОДГЕО¹) или с применением специального программного обеспечения, разработанного российскими учеными [11, 12].

В качестве альтернативного решения по регулированию отведения поверхностного стока в системы водоотведения можно обозначить развитие водно-зеленой инфраструктуры городов. Комплекс таких природных ландшафтов направлен на повышение

уровня комфорта городской среды, в том числе за счет решения климатических проблем. Примером может быть концепция «город-губка» (Sponge City), которая впервые была предложена китайскими учеными в начале 2000-х гг. [13]. В других странах концепция имеет другие наименования: «Водно-ориентированный городской дизайн (WSUD)» в Австралии, «Природоохранные решения» в Европе, «Развитие с минимальным воздействием на окружающую среду (LID)» в США и Канаде [14]. Суть «города-губки» (и эквивалентных ему понятий) состоит в создании биоинженерных сооружений и ландшафтных зон, способных принимать, накапливать, очищать дождевую воду, возвращать ее в природные водные объекты (или, при необходимости, использовать) для предотвращения подтопления территорий в период интенсивных ливней.

Основными видами биоинженерных сооружений для управления поверхностным стоком являются: дождевые сады, озелененные крыши, гидрботанические площадки, биодренажные канавы. Во многих странах интеграция биоинженерных сооружений в городскую среду обязательна согласно нововведениям в градостроительную нормативную документацию [15, 16]. Российские своды правил в сфере инженерных систем^{2, 3} и градостроительства^{4, 5} рассматривают водно-зеленую инфраструктуру в вопросе обращения с поверхностным стоком не как обязательный, а как возможный элемент при соблюдении природоохранного законодательства.

Дождевой сад — элемент озеленения, представляющий собой пониженный участок рельефа, где собирается дождевая вода с крыши, дороги, улицы, и позволяющий воде впитаться в землю (определение согласно СП⁵). Конструкция дождевого сада, предложенная в методических рекомендациях Министерства строительства и жилищно-коммуналь-

³ СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления.

⁴ СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.

⁵ СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий.

² СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.

ного хозяйства РФ⁶, представлена на рис. 2. Дождевой сад — это пониженные грунтовые территории, запроектированные для приема поверхностного стока. Дождевой сад предполагает почвенный слой высотой не менее 1 м для возможности выращивания крупной растительности. Под почвенным слоем предусматривается дренаж, состоящий из слоя гравия и песка (суммарной высотой не менее 0,3 м). Дренажный слой создается для обеспечения аккумуляции стока. Максимальное допустимое время пребывания стока в дренажном слое 72 ч, при большем времени возможно ухудшение санитарных характеристик местности, развитие насекомых. В зависимости от вида водоотведения дождевые сады подразделяются на инфильтрующие и неинфильтрующие. Инфильтрующие сады предусматривают конечную фильтрацию стока в естественный грунт. Такой вариант пригоден для грунтов с высоким коэффициентом фильтрации. Неинфильтрующие дождевые сады устраиваются на слабофильтрующих грунтах или при высоком уровне грунтовых вод. Такие сады предполагают наличие дренажных труб диаметром 100–150 мм, проложенных по основанию для отведения очищенного стока. В этом случае дождевые сады проектируются с гидроизоляционным слоем в боковых стенках и основании. К почвенному слою предъявляют ряд требований: он должен обладать высоким коэффициентом фильтрации, иметь достаточное для растений количество питательных веществ. Свойства почвы в целях повышения эффек-

тивности очистки поверхностного стока могут быть улучшены добавлением веществ с сорбционными или ионообменными свойствами (шунгит, торф, активированный уголь). Доля песка должна составлять 50–80 %, доля органического вещества 3–40 %, доля глинистых частиц допустима в интервале 3–25 %. Дождевые сады рекомендуется оборудовать переливным трубопроводом, обрез которого размещается на уровне максимального допустимого слоя осадков. Переливной трубопровод подключается к системе водоотведения. Эффективность очистки стока в дождевых садах по взвешенным веществам, органическим соединениям, нефтепродуктам и патогенным бактериям представлена в таблице. Эффективность очистки по металлам (медь, цинк, свинец) составляет от 93 до 98 %, по общему фосфору — от 70 до 83 %, по нитратам — от 68–80 %.

В работе [17] представлены варианты усовершенствованных дождевых садов для управления поверхностным стоком. Дождевой сад с резервуаром для фильтрации воды в грунт (рис. 3, а) позволяет временно накапливать дождевую воду в резервуаре, располагающемся под зелеными насаждениями, и постепенно пропускать ее в грунт-основание. Для организации дождевого сада рекомендуются почвенные субстраты, обладающие хорошей фильтрующей способностью, плодородностью. Кроме того, предполагается, что микроорганизмы, населяющие почвенный слой, будут принимать активное участие в биологической очистке стока. Предлагаются к посадке влаголюбивые виды растений (осока, папоротник, тростник), кустарники и невысокие деревья. Дренажная система резервуара должна обеспечивать

⁶ Методические рекомендации по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации.

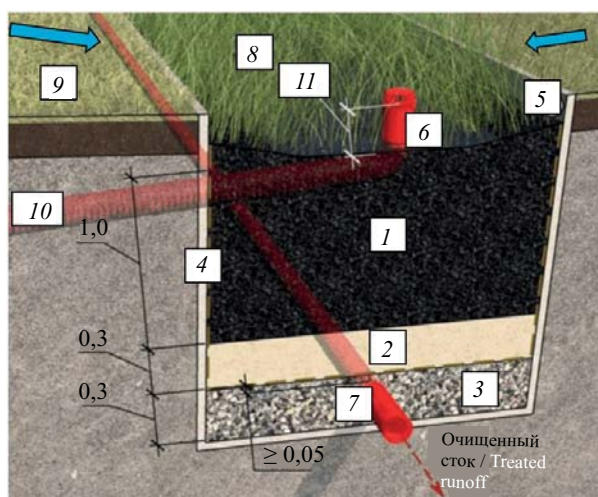


Рис. 2. Дождевой сад⁶: 1 — почвогрунт; 2 — песок; 3 — щебень; 4 — стена; 5 — геотекстиль; 6 — переливная труба; 7 — дренажная труба; 8 — растения; 9 — водосборная поверхность; 10 — водоотводящий трубопровод; 11 — допустимая высота слоя воды

Fig. 2. Rain garden⁶: 1 — planting soil; 2 — sand; 3 — crushed stone; 4 — wall; 5 — geotextile; 6 — overflow pipe; 7 — underdrain pipe; 8 — plants; 9 — catchment surface; 10 — outlet pipe; 11 — maximum allowable water depth

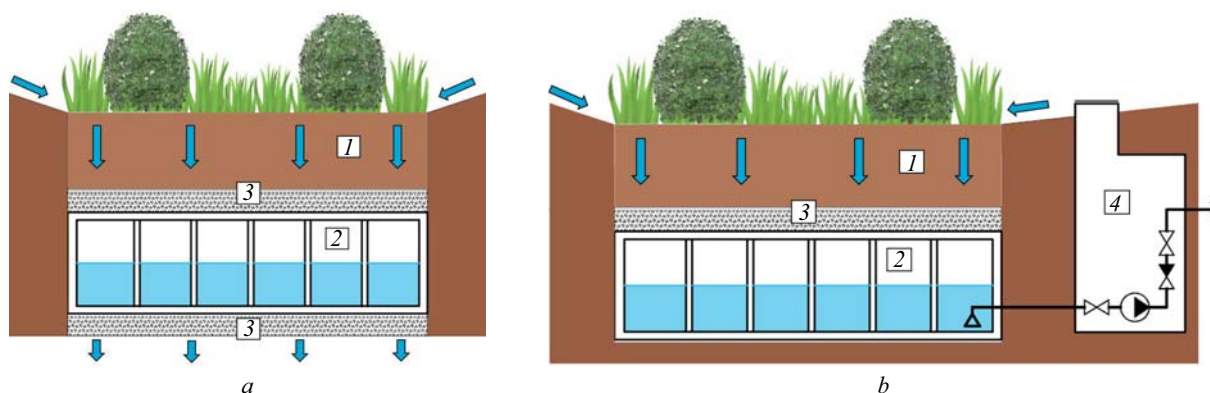


Рис. 3. Дождевой сад с резервуаром: *a* — с резервуаром для фильтрации воды в грунт; *b* — с резервуаром для накопления воды и насосной станцией; 1 — почвогрунт; 2 — резервуар; 3 — дренажный слой; 4 — насосная станция для перекачки поверхностного стока

Fig. 3. Rain garden with a tank: *a* — with an infiltration tank; *b* — with a storage tank and pumping station; 1 — planting soil; 2 — tank; 3 — drainage layer; 4 — pumping station for transferring surface runoff

медленную фильтрацию накопленного стока вглубь грунта-основания.

Дождевой сад с накоплением воды (рис. 3, *b*) предполагает возможность приема дождевого стока с прилегающих твердых покрытий в герметичный аккумулирующий резервуар для дальнейшего использования (полива зеленых насаждений, мытья УДС города, пополнения противопожарного запаса воды). Дождевой сад оснащается герметичным резервуаром. К нему подключается всасывающий трубопровод насосной станции, которая перекачивает сток на цели водоснабжения или в систему отведения поверхностного стока (при переполнении).

Большую популярность дождевые сады с резервуарами для накопления дождевой воды имеют на Тайване [18]. Их строительство было начато в 2019 г., а по состоянию на 2025 г. в республике функционирует 15 дождевых садов. Дождевые сады на Тайване выполняют три важнейшие функции: предупреждение подтоплений в период интенсивных дождей (среднее годовое количество осадков составляет 2500 мм), создание благоприятной городской среды в жаркий сезон (согласно данным полевого мониторинга температура почвы снижается на 2,4 °C), возможность использования собранной дождевой сточной воды для водоснабжения.

Положительный опыт разгрузки централизованной канализации путем создания дождевых садов имеется и в российских городах: Москве («Сад дождя» в Аптекарском огороде), Перми (проект «Зеленое кольцо»), Казани (водяные сады на берегу о. Кабан).

Нагрузка на дождевые сады будет определяться типом грунтов (их фильтрующей способностью), среднегодовой температурой воздуха. В исследовании [19] для проектирования дождевых садов предлагается использовать компьютерную гидрологическую модель DRAINMOD. По ряду исходных данных (интенсивность дождя, водосборная площадь, качественные показатели стока) она позволяет

определить необходимые размеры дождевого сада, требующуюся глубину почвенного слоя, а также эффективность очистки стока.

«Зеленые» (озелененные) крыши зданий и сооружений также являются элементом концепции «города-губки». Идея выращивания растений на крышах не нова: из античной истории известны висячие сады Семирамиды (рис. 4, *a*), имевшие эстетическую роль; в Норвегии с XVIII в. крыши зданий покрывали дерном, который защищал кровлю от повреждений и сноса в период сильных ветров, снижал потери тепла зимой (рис. 4, *b*). В части управления поверхностным стоком главная функция озелененной крыши — поглощение дождевой воды с целью предотвращения ее попадания в систему канализации и, как результат, снижение нагрузки на инженерную инфраструктуру города. К дополнительным преимуществам таких сооружений относят: создание для людей приятных мест отдыха и досуга; повышение ландшафтной привлекательности кровли при наблюдении с выше-расположенных отметок местности; продление срока службы изоляционного покрытия кровли; снижение теплопроводности кровли, что сокращает затраты на кондиционирование и обогрев воздуха в помещениях под ней; обеспечение дополнительной звукоизоляции, что может быть существенно в условиях городской среды; улучшение качества воздуха за счет фотосинтеза растений. По подсчетам экономистов оборудование «зеленой» крыши обходится дешевле, чем приобретение в собственность земельного участка для создания на нем зеленых насаждений. В странах, в которых поверхностный сток, отводимый в городскую канализацию, облагается налогом, создание «зеленых» кровель имеет особую актуальность. Согласно публикации [20] площадь крыш зданий и сооружений в современном мегаполисе может достигать 25 % общей территории, что обуславливает высокий потенциал задействования этих поверхностей при регулировании дождевого стока.



a



b

Рис. 4. Исторический опыт озеленения крыш⁷: *a* — висячие сады Семирамиды; *b* — крыши норвежских зданий
Fig. 4. Historical examples of green roofs⁷: *a* — the Hanging Gardens of Babylon; *b* — roofs of Norwegian buildings

В России устройство «зеленых» крыш постепенно приобретает популярность как в отношении жилых, так и общественных зданий (рис. 5). В жилых домах (повышенной этажности, высотных) объектами размещения озеленения чаще становятся стилобаты.

Устройство озелененных крыш в России нормируется ГОСТ Р 58875–2020⁸ и СП 17.13330⁹. Озелененная крыша имеет несколько слоев (рис. 6), каждый из которых выполняет определенную функцию.

Толщина субстрата, необходимого для выращивания растений, может быть различной и обуславливается типом озеленения:

- интенсивный: предполагает выращивание деревьев, кустарников и различных видов почво-

покровных растений, требующих постоянного ухода. Такой тип озеленения требует слоя субстрата высотой 300–700 мм;

- полуинтенсивный: предусматривает выращивание кустарников и почвопокровных растений при обеспечении периодического ухода. Данный тип озеленения требует слоя субстрата высотой 150–300 мм;

- экстенсивный: предполагает выращивание почвопокровных растений (мхи, травы, суккуленты), не требующих сложного ухода. Слой субстрата при этом может быть минимальным — 90–150 мм.

Предполагаемую высоту слоя субстрата следует учитывать при конструировании крыши в качестве дополнительной нагрузки на ее конструкции.

Особенно важно для озелененных крыш правильное водоотведение: в зависимости от высоты расположения крыши допускаются к устройству наружные и внутренние водостоки. При наличии наружных водостоков необходимо предотвращать зарастание водоприемных устройств травой, засорение субстратом, выносимым с озелененной поверхности.



a



b

Рис. 5. «Зеленая» крыша зданий г. Москвы: *a* — крыша административного здания, ул. Шереметьевская, д. 34⁷; *b* — крыша стилобата жилого комплекса, ул. Новочеремушкинская, д. 71/32 [21]

Fig. 5. Green roofs on buildings in Moscow: *a* — roof of an administrative building at 34 Sheremetyevskaya St.⁷; *b* — stylobate roof of a residential complex at 71/32 Novocheremushkinskaya St. [21]

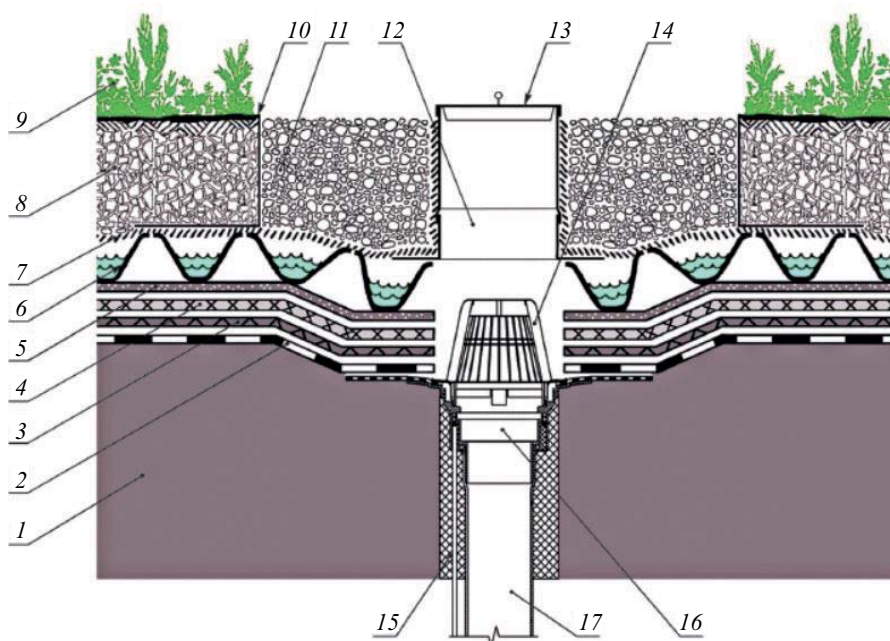


Рис. 6. Озелененная крыша⁸: 1 — несущая конструкция крыши; 2 — водоизоляционный слой; 3 — защитный слой; 4 — корнезащитный слой; 5 — влагонакопительный слой; 6 — дренажный слой; 7 — фильтрующий слой; 8 — субстрат; 9 — растительный слой; 10 — разделительный уголок; 11 — гравий; 12 — инспекционный колодец; 13 — надставной элемент; 14 — листвоуловитель воронки; 15 — герметик; 16 — корпус водоприемной воронки; 17 — водосток

Fig. 6. Green roof⁸: 1 — load-bearing roof structure; 2 — waterproofing layer; 3 — protective layer; 4 — root barrier layer; 5 — water-retention layer; 6 — drainage layer; 7 — filter layer; 8 — substrate; 9 — vegetation layer; 10 — separating edge profile; 11 — gravel; 12 — inspection chamber; 13 — extension element; 14 — roof-drain leaf guard; 15 — sealant; 16 — roof-drain body; 17 — downpipe

Водоприемными элементами внутренних водостоков являются водосточные воронки. Они должны обеспечивать возможность приема воды по всей толщине озелененной кровли. Наличие инспекционного колодца над воронкой позволяет осуществлять осмотр и очистку внутренней полости.

Зарубежными исследователями [22] доказана целесообразность применения биоугля, полученного в том числе при пиролизе осадков городских сточных вод, в составе почвенных смесей для озелененных крыш. Биоуголь (в количестве до 5 % по объему) способствует удержанию в почвенном слое биогенных элементов, необходимых для питания растений. Это обусловлено его высокой удельной площадью поверхности и адсорбционной способностью. Особенно целесообразно использование биоугля для кровель экстенсивного типа, высота почвенного слоя которых не превышает 150 мм. В целях экономии воды питьевого качества на нужды полива предлагаются к использованию предварительно очищенные на компактных установках «серые» сточные воды, образующиеся в здании (стоки от раковин, душевых, моек).

Интересен опыт озеленения крыш остановочных комплексов в г. Утрехте (Нидерланды)¹⁰: со-

общается об обновлении в 2019 г. 316 автобусных остановок. Их крыши были модернизированы и засажены суккулентными растениями (рис. 7) для решения ряда проблем, связанных с урбанизацией. Такие крыши обеспечивают впитывание дождевой воды, очищение воздуха, сохранение популяции пчел.

Гидробиотическая площадка (ГБП) — система из нескольких прудов (естественных или искусственных) с высшей водной растительностью, оборудованная подводящим и отводящим лотками, а также сорбирующими бонами для очистки воды от нефтепродуктов (рис. 8). Прообразом данных сооружений являются биопруды [23], возникшие в XIX в. для очистки (доочистки) городских сточных вод. Гидробиотическая площадка (рис. 8) устраивается в пониженном участке местности для приема стока с твердых дорожных покрытий. Лотком (канавой) сток подводится к буферному пруду, предназначенному для осаждения крупных фракций. Подводящий лоток оборудуется сороудерживающей решеткой для обеспечения процеживания воды и бонами из сорбирующего нефтепродукты материала. Буферный пруд, выполняющий роль аккумулятора и отстойника, соединен с ГБП, предусмотренной для биологической очистки поверхностного стока. В зоне ГБП осуществляются процессы очистки сточных вод — биологическое окисление, осаждение и сорбция. Эти процессы обеспечиваются сообществом

¹⁰ These bus stops are a sanctuary for bees. URL: <https://www.weforum.org/stories/2019/07/bees-can-take-refuge-on-these-bus-stop-green-roofs/>



Рис. 7. Крыша автобусной остановки в г. Утрехте (Нидерланды)¹⁰

Fig. 7. Bus stop roof in Utrecht (Netherlands)¹⁰

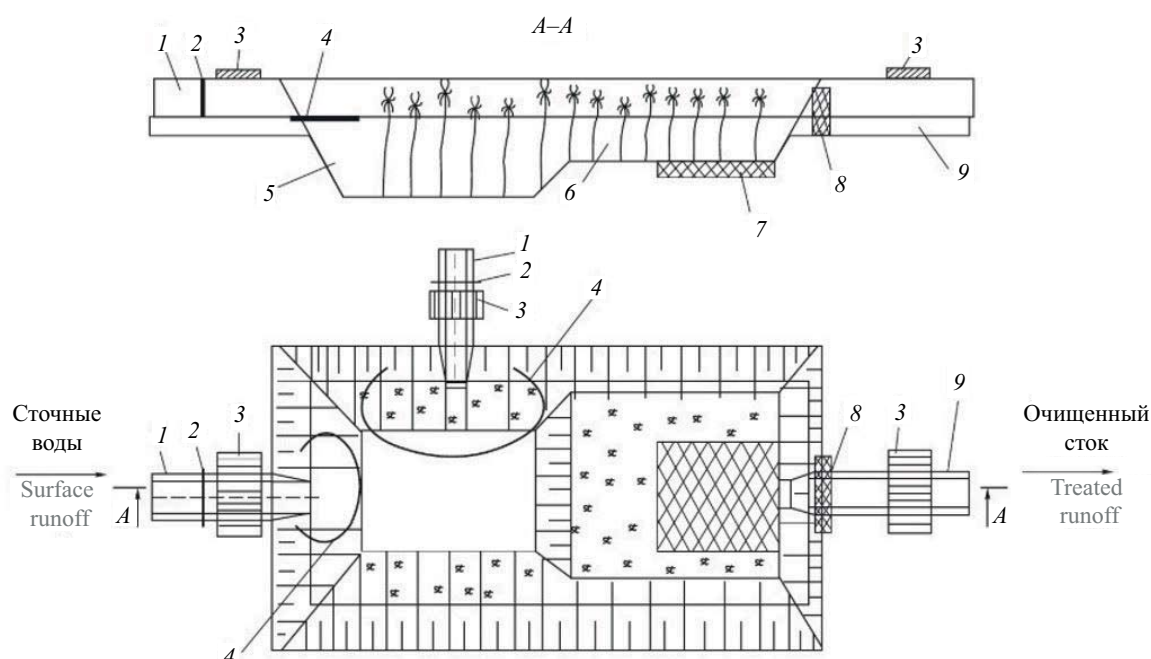


Рис. 8. Схема гидроботанической площадки с усиленной защитой от нефтепродуктов¹¹: 1 — подводящий лоток (канавка); 2 — решетка для улавливания плавающего мусора; 3 — мостки; 4 — плавающие боны из сорбирующего нефтепродукты материала; 5 — буферный пруд для осаждения наиболее крупных фракций взвешенных веществ; 6 — основной пруд с высшей водной растительностью; 7 — площадка на дне пруда, выстланная слоем природных сорбентов; 8 — фильтрующая кассета с загрузкой природным сорбентом; 9 — отводящий лоток (канавка)

Fig. 8. Layout of a constructed wetland with enhanced protection against petroleum hydrocarbons¹¹: 1 — inlet channel (ditch); 2 — screen for retaining floating debris; 3 — walkways; 4 — floating booms made of oil-sorbent material; 5 — buffer pond for sedimentation of the coarsest fractions of suspended solids; 6 — the main pond with higher aquatic vegetation; 7 — a platform at the bottom of the pond, lined with a layer of natural sorbents; 8 — a filter cartridge loaded with natural sorbent; 9 — a drainage tray (ditch)

¹¹ ОДМ 218.8.005–2014. Методические рекомендации по содержанию очистных сооружений на автомобильных дорогах.

микроорганизмов, растительностью, почвенным слоем. Очистке стока способствуют природно-климатические факторы — солнечная радиация, аэрация. Площадка засаживается водной растительностью: ряской, эйхорнией, рогозом, камышом, тростником. На выпуске очищенного стока с площадки следует предусматривать боны из сорбирующего нефтепродукты материала, а также фильтрующую кассету, заполненную природным сорбентом. Сведения об эффективности очистки стока, прошедшего через ГБП, приведены в таблице.

Гидробиотическая площадка имеет много общего с фитоочистными сооружениями, подробно описанными в работе [24]. В зависимости от глубины расположения отводящего лотка (трубопровода) по отношению к поверхности земли, а также наличия или отсутствия дренажных труб в основании предлагается разделение фитоочистных сооружений на виды: со свободной водной поверхностью (лоток отводит очищенный сток от поверхности), с горизонтальным подповерхностным потоком (отводящий трубопровод отводит очищенный сток от уровня основания), с вертикальным подповерхностным потоком (отведение очищенного стока осуществляется дренажными трубами, проложенными в основании фитоочистного сооружения).

Биодренажная канава представляет собой небольшой по площади участок трапециевидного сечения глубиной до 1 м, засаженный растительностью (рис. 9). В низине площадки (под растительным слоем) предусматривается дренажная ниша, по дну которой проложен отводящий перфорированный трубопровод. Дренажный слой ниши выполняется из гравия, водоемкость дренажа принимается равной 40–45 % объема загрузки. Скорость движения стока по склонам канавы должна быть не более 0,8 м/с. Может быть целесообразно укрепление склона георешетками (геосетками). Согласно Своду правил⁵ ширина биодренажной канавы принимается не ме-

нее 2 м, глубина 0,2–1,0 м. Для почвенного слоя, высота которого должна быть не менее 150 мм, подходит чернозем, смешанный с песком. Биодренажная канава засаживается дикорастущей или специально подобранной растительностью с тонкими стеблями высотой 50–150 мм. Сообщается [25] о положительном опыте озеленения биодренажных канав такими растениями, как сныть, анемона, подорожник, клевер и герань. Необходимо, чтобы подобранная растительность соответствовала световым и климатическим особенностям места размещения. При ширине дренажной канавы не менее 30 м достигается следующая эффективность очистки стока в соответствии с методическими рекомендациями⁶: по металлам (кадмий, медь, цинк, свинец) — от 50 до 90 %, по общему фосфору — 9 %, по нитратам — 38 %. Эффективность очистки по прочим показателям представлена в таблице.

Российскими учеными [26] предлагается конструкция биофильтрационного модуля (рис. 10) — это две емкости, размещенные друг над другом. В первой емкости осуществляется накопление поверхностного стока, его фильтрация через почвенный слой, засаженный высшей водной растительностью. Сток, профильтровавшийся через почвенный слой и дренаж, через выпускное отверстие попадает в нижнюю емкость. В ней сток, протекая между вертикальными перегородками, фильтруется через сорбционные маты. Они способствуют дополнительному задержанию взвешенных веществ, органических примесей, нефтепродуктов и тяжелых металлов. Очищенный сток (по данным авторов изобретения) может быть отправлен в водоотводящую сеть, водоприемник или в аккумулирующую емкость для последующего использования воды.

В настоящее время ощущается нехватка руководящих документов, содержащих подробную информацию об эффективности очистки поверхностного стока посредством различных видов биоинженерных сооружений. Пожалуй, наибольшую ценность в данном вопросе имеют методические рекомендации Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ⁶. Сведения об эффективности очистки дождевого стока в биоинженерных сооружениях, основанные на методических рекомендациях, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, представлены в таблице. Очистка от взвешенных веществ обусловлена процессами седиментации и фильтрации. Биологическая очистка, осуществляемая преимущественно до глубины 40 см от поверхности земли, обусловлена седиментацией, процессами биосорбции и биоразложения (обеспечиваются микроорганизмами почвенного слоя), воздействием солнечной радиации. Большая роль в биологической очистке отводится корням и корневищам: вокруг них формируются аэробные зоны, необходимые для микроорганизмов. Тяжелые металлы и нефтепродукты выводятся из состава

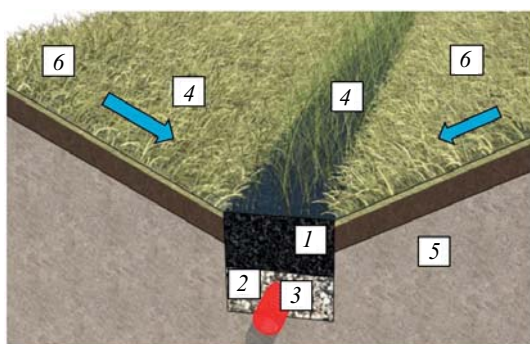


Рис. 9. Биодренажная канава⁶: 1 — фильтрующая загрузка; 2 — дренажный слой; 3 — отводящий трубопровод; 4 — растительность; 5 — естественный грунт; 6 — водосборная поверхность

Fig. 9. Bioswale⁶: 1 — filter media; 2 — drainage layer; 3 — outlet pipe; 4 — vegetation; 5 — native soil; 6 — catchment surface

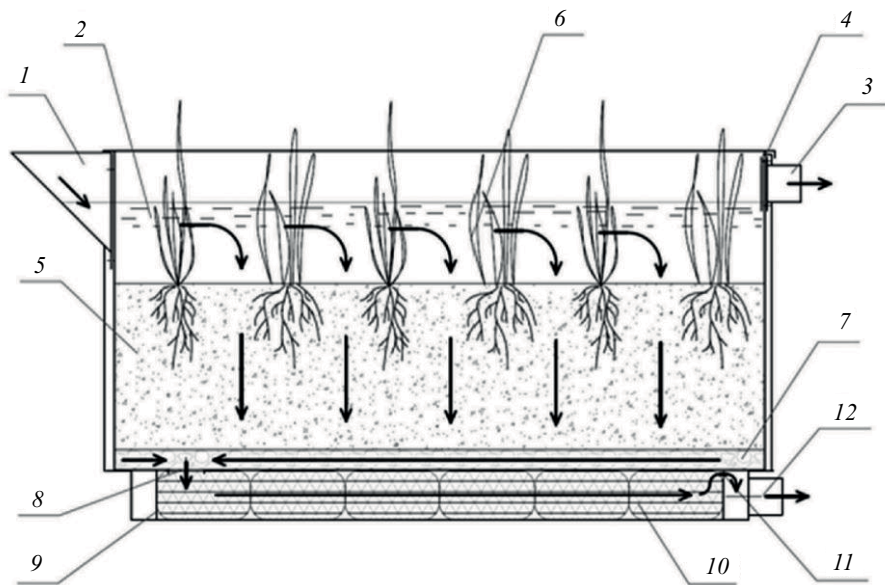


Рис. 10. Биофильтрационный модуль [26]: 1 — входной элемент; 2 — зона накопления стоков; 3 — переливной патрубок; 4 — сороудерживающая решетка; 5 — фильтрующая загрузка; 6 — корневая система высаженных растений; 7 — дренажный слой; 8 — выпускное отверстие; 9 — блок сорбционной доочистки; 10 — сорбционные маты; 11 — щелевой слив; 12 — отводящий патрубок

Fig. 10. Biofiltration module [26]: 1 — inlet element; 2 — runoff storage zone; 3 — overflow branch pipe; 4 — debris-retention screen; 5 — filter media; 6 — root system of the planted vegetation; 7 — drainage layer; 8 — outlet opening; 9 — sorption post-treatment unit; 10 — sorption mats; 11 — slot drain; 12 — outlet branch pipe

стока природными сорбентами — почвенным слоем и корнями растительности. В исследовании [27], информационно-техническом справочнике¹² сообщается, что фитоочистка поверхностного стока может производиться и в холодный период года: для этого необходимо мульчирование поверхности грунта природными органическими материалами — опилками, корой деревьев, сеном или торфом. Мульча способствует защите почвы и ее биоценоза от промерзания.

¹² ИТС 8–2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях.

Согласно таблице сведения об эффективности очистки поверхностного стока в биоинженерных сооружениях, представленные в ряде информационных источников, расходятся. Показатели характеризуются широкими интервалами возможных значений, что, по всей вероятности, может быть обусловлено большим разнообразием конструктивных решений сооружений, различиями исходного качественного состава стока.

Сокращению объема образующегося поверхностного стока в условиях городской среды способствуют дренарующие дорожные покрытия [30]. Они рекомендуются для обустройства тротуаров, вело-

Сведения об эффективности очистки дождевого стока на биоинженерных сооружениях различных видов
Stormwater runoff treatment efficiency by bioengineering facilities of various types

Сооружение Facility	Эффективность очистки, % Treatment efficiency, %				
	Взвешенные вещества Suspended substances	БПК ₅ BOD	ХПК COD	Нефтепродукты Oil products	Патогенные бактерии Pathogenic bacteria
Дождевой сад Rain garden	90 ⁶	90 ⁶	–	75 ⁶	90 ⁶
	80–96 [28]	85–95 [28]	80–92 [28]	–	97–99 [28]
	70–100 [29]	–	–	70–100 [29]	70–100 [29]
Биодренажная канава Bioswale	81 ⁶	67 ⁶	–	62 ⁶	–
	70–95 [28]	85–95 [28]	70 [28]	–	97–99 [28]
	40–70 [29]	–	–	40–70 [29]	10–40 [29]

Сооружение Facility	Эффективность очистки, % Treatment efficiency, %				
	Взвешенные вещества Suspended substances	БПК ₅ BOD	ХПК COD	Нефтепродукты Oil products	Патогенные бактерии Pathogenic bacteria
Гидрботаническая площадка Hydro-botanical site	96–98 ¹²	90–92 ¹³	–	95–97 ¹²	–
Биопруд Biopond	90–98 [23]	60–98 [23]	–	–	–
Фитоочистное сооружение с горизонтальным подповерхностным потоком Phyto-purification facility with horizontal subsurface flow	83–95 [24]	92–98 [24]	90 [24]	–	98–99 [24]

рожек, площадей. Дренажные покрытия не сокращают пространство для мобильности, но в то же время не позволяют стоку скапливаться на поверхности. Примерами такого покрытия могут быть дренажный асфальтобетон, дренажный цементобетон [31], дренажная тротуарная плитка (в том числе предполагающая заполнение стыкового пространства мелким гравием), несплошная плитка с заполнением полости грунтом (рис. 11). В качестве основания под такие типы покрытий используется песок, гравий, щебень. Дренажные покрытия эффективны при небольшом уклоне поверхности стока (0,005 и менее).

Научно-технический прогресс последнего десятилетия направлен не только на внедрение биоинженерных сооружений для регулирования поступления поверхностного стока в системы водоотведения, но и на рассмотрение стока как ресурса — альтернативного источника водоснабжения. Особую актуальность использование дождевой воды имеет в вододефицитных регионах. Дождевая сточная вода [32], аккумулируемая в резервуарах, может на 30–60 % снизить расход воды из системы питьевого централизованного водопровода. Задействование дождевого стока для водоснабжения предполагают российские своды правил по проектированию инженерных систем^{2, 14}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инженерные сети и сооружения для сбора, отведения и очистки поверхностного стока (или так называемая «серая» инфраструктура города согласно общемировой терминологии в сфере урбанистики) положительно зарекомендовали себя в практике обращения с атмосферными сточными водами в условиях городской среды. Однако с учетом того, что не все города в достаточной мере обеспечены системами отведения поверхностного стока, в условиях необходимости повышения комфортности микроклимата городской застройки целесообразным видится внедрение природных решений («водно-зеленой» инфраструктуры) для управления поверхностным стоком — биоинженерных систем, способных аккумулировать, очищать и возвращать сток в водные объекты.

¹³ Очистные сооружения для автодорог // Аргель. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/ochistnyie-sooruzheniya-dlya-avtodorog/gidrobotanicheskie-ploschadki>

¹⁴ СП 253.1325800.2016. Инженерные системы высотных зданий.

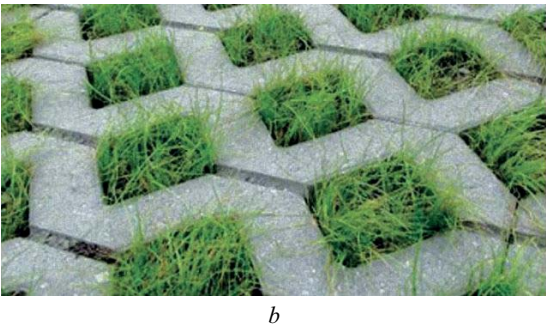
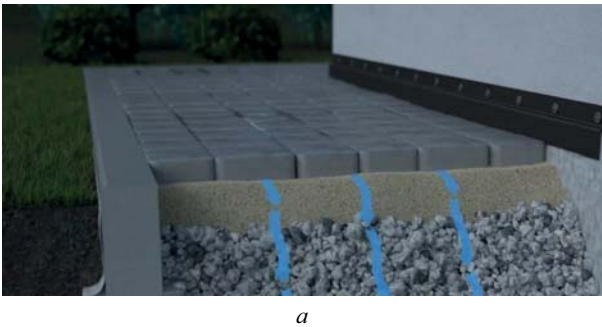


Рис. 11. Дренажные покрытия: а — бетонная плитка на фильтрующем основании; б — бетонная решетка (фото из открытых источников)

Fig. 11. Permeable pavements: а — concrete pavers on a filter base; б — concrete grid pavement (photograph from open sources)

Преимущества биоинженерных сооружений для регулирования поверхностного стока состоят в низких капитальных и эксплуатационных затратах, простоте функционирования и обслуживания, возможности гармоничной интеграции в ландшафт городской среды. Данные сооружения способствуют повышению устойчивости городской среды, ее экологической сбалансированности. Российская нормативно-техническая документация указывает на необходимость учета природоохранного законодательства при устройстве биоинженерных сооружений в населенных пунктах.

Эффективность очистки поверхностного стока на биоинженерных сооружениях следует устанавливать индивидуально для каждого проекта с учетом исходного качества стока, климатических показателей, параметров сооружения (габаритные размеры, влагоемкость и состав фильтрующего слоя, особен-

ности растительности). При выпуске очищенного стока с биоинженерного сооружения в водные объекты (категорий А, Б, В, Г) стоит учитывать достаточно строгие требования к концентрациям загрязняющих веществ, предъявляемые российским законодательством¹⁵.

Вероятно, проблема эффективного управления поверхностным стоком в условиях современных больших и малых городов может быть решена при объединении усилий инженеров в сфере водоотведения, очистки сточных вод и специалистов в области экоурбанистики.

¹⁵ Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов : Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 № 1430.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сиваев С.Б., Абдуллаев А.М., Смирнов О.О., Заляев Э.С., Андреева Е.С., Летуновский А.В. и др. Ливневая канализация в современном городе. От тарификации до инфильтрации : монография. М. : Высшая школа экономики, 2023. 120 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-2797-9. EDN QSWKWI.
2. Sezer N., Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting // Nano Energy. 2021. Vol. 80. P. 105567. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105567. EDN ELPQPL.
3. Zhang J., Li Ch., Zhang X., Zhao T. Improving simulations of extreme precipitation events in China by the CMIP6 global climate models through statistical downscaling // Atmospheric Research. 2024. Vol. 303. P. 107344. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107344. EDN XFMAPA.
4. Глухова К.А., Лапина Е.А. Современные технологии биоочистки поверхностных дождевых вод в структуре городской среды // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2022. № 6. С. 218–226. EDN BXJJFK.
5. Борисов А.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Бухонов А.В. Аридизация климата в пустынно-степной зоне: причины, формы проявления и влияние на жизнь древнего населения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. 2018. Т. 23. № 3. С. 52–62. DOI: 10.15688/jvolsu4.2018.3.5. EDN XSQCMH.
6. Парфенова А.В., Дашкевич Л.В. Аридизация климата Ростовской области // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 131–138. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-131-138. EDN GTZPBC.
7. Крашенинников А.В., Садковская О.Е. Градостроительная реконструкция малых и средних городов с учетом изменения климата // Sciences of Europe. 2017. № 18–2 (18). С. 3–12. EDN ZHMUSH.
8. Дьяконов К.Н., Пыленок П.И., Харитонов Т.И. Водный режим Окской поймы в условиях изменения климата как фактор ограничения природопользования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2024. Т. 79. № 5. С. 162–170. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.14. EDN GNLCEP.
9. Зайцев М.В., Шешнев А.С. Проблема изменения русла Волги у Саратова и попытки ее решения во второй половине XIX – начале XX века // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 5. С. 815–826. DOI: 10.31857/S2587556622050156. EDN TAJXNJ.
10. Болгов М.В., Беляев А.И. Водные проблемы Нижней Волги: основные факторы и компенсирующие мероприятия // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 862–874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU.
11. Патент RU № 2020618130. Программа определения параметров ливней на основе метеорологических данных / Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Саркисов С.В. и др.; заявл. № 2020617168 от 13.07.2020; опубл. 20.07.2020. Бюл. № 7. 1 с.
12. Патент RU № 2020618130. Программа «Поток 2020» для автоматизированного расчета систем сброса и отведения поверхностного стока с сельских территорий и площадок предприятия, а также

для автоматизированного расчета производительности насосной станции для перекачки поверхностного стока в расчетном сечении / *Тингушова Е.А., Сухарева Л.Е., Ефимова М.Ю. и др.*; заявл. № 2020617203 от 07.07.2020; опубл. 20.07.2020. Бюл. № 7. 1 с.

13. *Yuan Yu., Zheng Ya., Zhai J., Huang X., Yao M., Shi J.* How does the sponge city pilot policy affect the urban water system climate resilience: Quasi-experimental evidence from China // *Urban Climate*. 2025. Vol. 64. P. 102643. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102643. EDN MAGPOP.

14. *Алтунин Г.В.* Дождевые сады как часть экологической и инженерной системы города // *Архитектурные исследования*. 2024. № 1 (37). С. 99–105. EDN OQFJQO.

15. *Дубино А.М.* Зарубежный опыт включения водно-зеленого каркаса в градостроительную документацию // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2025. № 3 (72). С. 275–292. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292. EDN TAMVUU.

16. *Дубино А.М., Перькова М.В.* Анализ зарубежного опыта водосберегающего проектирования городских территорий // *Техническая эстетика и дизайн-исследования*. 2021. Т. 3. № 3. С. 24–33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY.

17. *Харитонов А.С., Франкив Е.Е.* Концепция «город-губка». Адаптация ливневой канализации к изменениям климата // *Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения*. 2025. № S1. С. 186–194. EDN XLDTUH.

18. *Chen Ch.F., Chen Yi.W., Lin Ch.H., Lin J.Ya.* Field performance of 15 rain gardens in different cities in Taiwan // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 947. P. 174545. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174545. EDN OQKOUQ.

19. *Li J., Liu F., Li Ya.* Simulation and design optimization of rain gardens via DRAINMOD and response surface methodology // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 585. P. 124788. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124788. EDN FTRIBB.

20. *Croce S., Vettorato D.* Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 75. P. 103313. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103313. EDN UKQGBR.

21. *Шонина Н.А.* Зеленая крыша каменных джунглей // *Сантехника*. 2011. № 6.

22. *Petreje M., Sněhota M., Chorazy T., Novotný M., Rybová B., Hečková P.* Performance study of an innovative concept of hybrid constructed wetland-extensive

green roof with growing media amended with recycled materials // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 331. P. 117151. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117151. EDN FZYKJW.

23. *Яковлев С.В., Воронов Ю.В.* Водоотведение и очистка сточных вод : учебное пособие. М. : Издательство АСВ, 2002. 704 с. EDN TBDTV L.

24. *Щеголькова Н.М., Диас В., Криксунов Е.А., Рыбка К.Ю.* Фито-системы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем // *Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения*. 2015. № 2. С. 50–59. EDN XRHNMH.

25. *Витюк Е.Ю.* Биодренажные канавы и дождевые сады как инструмент благоустройства современного города // *Архитектон: Известия вузов*. 2022. № 3 (79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11. EDN RUDKSF.

26. Патент RU № 2791881. Биофильтрационный модуль для очистки поверхностного стока и способ его работы / *Саянов А.А., Шукин И.С.*; заявл. № 2022115145 от 08.07.2022; опубл. 14.03.2023. Бюл. № 8. 14 с.

27. *Графкина М.В., Витковский Д.В.* Некоторые аспекты проектирования фитоочистных сооружений // *Управление техносферой*. 2023. Т. 6. № 2. С. 158–169. DOI: 10.34828/UdSU.2023.72.29.003. EDN UMQMGR.

28. *Брешиани Р.* Фитоочистка как инновационный метод водоочистки // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 7. С. 885–900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900. EDN UBHFBA.

29. *Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С.* Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452. EDN AIPUNV.

30. *Дергунова А.В., Пиксайкина А.А.* Применение пористых тротуаров в создании инфраструктуры городской среды // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 12 (123). С. 1440–1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447. EDN YTATFJ.

31. *Маткин А.А., Бикбай М.Я.* Дренирующий бетон КАПСИМЭТ и новое оборудование для строительства дорог и инженерных сооружений // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 45–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-45-51 EDN ZCTACI.

32. *Santos C., Taveira-Pinto F.* Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods // *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. Vol. 71. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.11.004

Поступила в редакцию 22 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Юлия Александровна Рыльцева** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.

REFERENCES

1. Sivaev S.B., Abdullaev A.M., Smirnov O.O., Zalyan E.S., Andreeva Ye.S., Letunovskii A.V. et al. *Storm sewers in a modern city. From billing to infiltration*. Moscow, Higher School of Economics, 2023; 120. DOI: 10.17323/978-5-7598-2797-9. EDN QSWKWI. (rus.).
2. Sezer N., Koç M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*. 2021; 80:105567. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105567. EDN ELPQPL.
3. Zhang J., Li Ch., Zhang X., Zhao T. Improving simulations of extreme precipitation events in China by the CMIP6 global climate models through statistical downscaling. *Atmospheric Research*. 2024; 303:107344. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107344. EDN XFMAPA.
4. Glukhova K., Lapshina E. Modern technologies for bio-treatment of surface rain water in the structure of the urban environment. *Architecture and design: history, theory, innovation*. 2022; 6:218-226. EDN BXJFK. (rus.).
5. Borisov A.V., Eltsov M.V., Udaltsov S.N., Bukhonov A.V. Climate aridization in the desert-steppe zone: the causes, results and impact on life of the ancient population. *Science Journal of Volgograd State University. History. Area Studies. International Relations*. 2018; 23(3):52-62. DOI: 10.15688/jvolsu4.2018.3.5. EDN XSQCMH. (rus.).
6. Parfenova A.V., Dashkevich L.V. Aridization of the climate of the Rostov region. *Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems*. 2021; 1(6):131-138. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-131-138. EDN GTZPBC. (rus.).
7. Krashenninnikov A.V., Sadkovskaya O.E. Reconstruction of the small cities of the Rostov region with consideration for climate change. *Sciences of Europe*. 2017; 18-2(18):3-12. EDN ZHMUSH. (rus.).
8. Diakonov K.N., Pylenok P.I., Kharitonova T.I. Water regime of the Oka river floodplain under climate change as a factor limiting nature management. *Lomonosov Geography Journal*. 2024; 79(5):162-170. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.14. EDN GNLCEP. (rus.).
9. Zaytsev M.V., Sheshnev A.S. The problem of Volga riverbed changing near Saratov and attempts to solve it in the second half of the 19th – early 20th century. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2022; 86(5):815-826. DOI: 10.31857/S2587556622050156. EDN TAJXHH. (rus.).
10. Bolgov M.V., Belyaev A.I. Water problems of the lower Volga: main factors and compensating measures. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2023; 87(6):862-874. DOI: 10.31857/S2587556623060031. EDN EZEJWU. (rus.).
11. Patent RU No. 2020618130. *A program for determining rainfall parameters based on meteorological data* / Ignatchik V.S., Ignatchik S.Yu., Sarkisov S.V. appl. No. 2020617168 / 13.07.2020; publ. 20.07.2020. Byul. No. 7; 1. (rus.).
12. Patent RU No. 2020618130. *The Potok 2020 program for the automated calculation of surface runoff discharge and discharge systems from residential areas and sites of the enterprise, as well as for the automated calculation of the pumping station capacity for pumping surface runoff in the design section* / Tingushova E.A., Sukhareva L.E., Efimova M.Yu. No. 2020617203 / 07.07.2020; publ. 20.07.2020. Byul. No. 7; 1. (rus.).
13. Yuan Yu., Zheng Ya., Zhai J., Huang X., Yao M., Shi J. How does the sponge city pilot policy affect the urban water system climate resilience: Quasi-experimental evidence from China. *Urban Climate*. 2025; 64:102643. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102643. EDN MAGPOP.
14. Altunin G.V. Rain gardens as part of the city ecological and engineering system. *Architectural Research*. 2024; 1(37):99-105. EDN OQFJQO. (rus.).
15. Dubino A.M. International experience in integrating blue-green infrastructure into urban planning documentation. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2025; 3(72):275-292. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-275-292. EDN TAMVUU. (rus.).
16. Dubino A., Per'kova M. Analysis of foreign experience in water-saving design of urban territories. *Technical Aesthetics and Design Research*. 2021; 3(3):24-33. DOI: 10.34031/2687-0878-2021-3-3-24-33. EDN VNQDVY. (rus.).
17. Kharitonov A.S., Frankiv Ye.E. Adaptation of storm sewers to climate change. *The best available water supply and sanitation technologies*. 2025; S1:186-194. EDN XLDTUH. (rus.).
18. Chen Ch.F., Chen Yi.W., Lin Ch.H., Lin J.Ya. Field performance of 15 rain gardens in different cities in Taiwan. *Science of The Total Environment*. 2024; 947:174545. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174545. EDN OQKOUQ.
19. Li J., Liu F., Li Ya. Simulation and design optimization of rain gardens via DRAINMOD and response surface methodology. *Journal of Hydrology*. 2020; 585:124788. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124788. EDN FTRIBB.

20. Croce S., Vettorato D. Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 75:103313. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103313. EDN UKQGBR.
21. Shonina N.A. The green roof of the stone Jungle. *Plumbing*. 2011; 6. (rus.).
22. Petreje M., Sněhota M., Chorazy T., Novotný M., Rybová B., Hečková P. Performance study of an innovative concept of hybrid constructed wetland-extensive green roof with growing media amended with recycled materials. *Journal of Environmental Management*. 2023; 331:117151. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117151. EDN FZYKJW.
23. Yakovlev S.V., Voronov Yu.V. *Wastewater disposal and treatment*. Moscow, ASV Publishing House, 2002; 704. EDN TBDTV. (rus.).
24. Shchegolkova N.M., Dias V., Kriksunov Ye.A., Ribka K.Yu. Phyto-systems for wastewater treatment: a modern solution to environmental problems. *The best available water supply and sanitation technologies*. 2015; 2:50-59. EDN XRHNMH. (rus.).
25. Vitiuk E.Yu. Biodrainage ditches and rain gardens as improvement tools in a modern city. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 3(79). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-3(79)-11. EDN RUDKSF. (rus.).
26. Patent RU No. 2791881. *Biofiltration module for treatment of surface runoff and method of its operation* / Saianov A.A., Shchukin I.S. No. 2022115145 / 08.07.2022; publ. 14.03.2023. Byul. No. 8; 14. (rus.).
27. Grafkina M.V., Vitkovsky D.V. Some aspects of designing phytotreatment facilities. *Management of the Technosphere*. 2023; 6(2):158-169. DOI: 10.34828/UdSU.2023.72.29.003. EDN UMQMGR. (rus.).
28. Bresciani R. Constructed wetland technology as an innovative water treatment method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):885-900. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900. EDN UBHFBA. (rus.).
29. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Green infrastructure as a stormwater management tool. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1429-1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452. EDN AIPUNV. (rus.).
30. Dergunova A.V., Piksaykina A.A. The use of porous pavements in creating the infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(12):1440-1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447. EDN YTATFJ. (rus.).
31. Matkin A.A., Bikbau M.Ya. Drainage concrete KAPSIMET and new equipment for the construction of roads and engineering structures. *Construction Materials*. 2022; 5:45-51. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-802-5-45-51 EDN ZCTACI. (rus.).
32. Santos C., Taveira-Pinto F. Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013; 71:1-6. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.11.004

Received December 22, 2025.

Adopted in revised form on December 29, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: **Yuliya A. Ryltseva** — Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of Water supply and water removal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; yuliya.ryltseva@mail.ru.