

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 5 / 2024, Vol. 16, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/33NZVN524.pdf>

DOI: 10.15862/33NZVN524 (<https://doi.org/10.15862/33NZVN524>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сысоева, Е. В. Районирование территории Центральной России по эффективности применения «зеленых» крыш с целью сокращения ливневого стока / Е. В. Сысоева, А. В. Богачев // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/33NZVN524.pdf> DOI: 10.15862/33NZVN524

For citation:

Sysoeva E.V., Bogachev A.V. Zoning of the Central Russian by the efficiency of green roofs in reducing excessive storm runoff. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(5): 33NZVN524. Available at: <https://esj.today/PDF/33NZVN524.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/33NZVN524

УДК 692.433

Сысоева Елена Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Доцент кафедры «Архитектурно-строительного проектирования и физики среды»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: SysoevaEV@mgsu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=755880

Богачев Алексей Вячеславович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Преподаватель кафедры «Архитектурно-строительного проектирования и физики среды»,

аспирант кафедры «Инженерных изысканий и геоэкологии»

E-mail: BogachevAV@mgsu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1251350

Районирование территории Центральной России по эффективности применения «зеленых» крыш с целью сокращения ливневого стока

Аннотация. В связи с возросшим вниманием общественности и правительства Российской Федерации к вопросам экологии и их решению с помощью современных средств и методик, в данной работе рассматривается тема эффективности использования «зеленых» крыш в качестве устойчивого средства борьбы с проблемами организации и отвода объема ливневых стоков в городах России. Возможность такого исследования объясняется тем, что конструкция озелененных крыш состоит из нескольких слоев, почти каждый из которых способен удерживать в себе воду, снижая тем самым общий объем дождевых стоков, что, в свою очередь, снизило бы нагрузку на канализационную систему и улучшило экологическое благосостояние городской среды. Прежде всего, чтобы спрогнозировать целесообразность устройства «зеленых» крыш в разных городах нашей страны, авторы приводят описание расчетной модели такой озелененной крыши. Авторы выбрали наиболее легковозводимый и малозатратный в обслуживании тип озеленения, соответствующий всем стандартам строительства «зеленых» крыш, а также заложили наиболее доступные материалы. В статье была составлена методика, позволяющая определить объем водонакопления «зеленой» крыши с заданными параметрами. Результаты полученных вычислений были соотнесены с

показателями объема осадков в разных субъектах Российской Федерации. В результате чего был сформирован список территорий, на которых применение «зеленых» крыш (в том числе при пиковых значениях осадков) было бы наиболее эффективно, а также разработана и отражена карта распределения оптимальной толщины субстратного слоя для исследуемого региона.

Ключевые слова: «зеленая» крыша; озеленение крыш; ливневый сток; сокращение стока; субстрат; дренаж; карта

Введение

Сегодня «зеленые» крыши рассматриваются в основном как необычная и оригинальная технология строительной отрасли, которая в России в силу своего слабого распространения особенно экзотична [1]. С одной стороны, технология озеленения крыш зданий и сооружений требует разработки особых узкоспециализированных строительных материалов и дополнительной проработки нормативно-технической документации, а с другой, открывает новые возможности эксплуатации поверхностей крыш [2; 3] и стилобатов, а также оказывает комплексное влияние на экологическое благосостояние среды [4], в том числе на водный баланс в системе озеленения [5]. В действительности же эти утверждения верны лишь частично. Дело в том, что еще с древних времен человек начал озеленять крыши не просто для достижения необходимого архитектурного образа, но и как функционально значимый для эксплуатации сооружения метод строительства [6], что легко доказать на примере Висячих садов Семирамиды. Озеленение ярусов этих древневавилонских зиккуратов, помимо прочего, было направлено на осознанное управление водным балансом и на его поддержание во всей системе озеленения [7].

Прошли века, а проблема циркуляции вод в системах различного масштаба в населенных пунктах все еще остро стоит перед инженерами и прочими специалистами. В России регулярно отмечаются серьезные подтопления территорий городов. Это происходит из-за того, что системы канализации большинства городов не соответствуют их актуальному режиму работы с избыточным количеством водонепроницаемых поверхностей. Показательны, например, последние события. Это, скажем, затопление улиц в Краснодаре, произошедшее в январе 2024 года.¹ Похожая ситуация наблюдалась во Владивостоке 25 августа 2023 года² (30 мм осадков выпало за несколько часов) или же в подмосковном Одинцове 26 июля 2023 года³ (20–25 мм осадков за 2 часа). Эти и аналогичные прецеденты заставляют задуматься о путях решения проблемы подтоплений. Одно из возможных эффективных средств борьбы с избыточным объемом ливневых стоков — это использование озеленения не только на уровне планировочной отметки земли, но в том числе и на крышах зданий.

Кроме того, Президентом нашей страны в ноябре 2023 года был выпущен Указ⁴, который подтверждает актуальный запрос по внедрению природоподобных технологий в нашей стране, в том числе и «зеленых» крыш.

¹ В Краснодаре затопило улицы после дождя // Известия. URL: <https://iz.ru/1640182/2024-01-26/v-krasnodare-zatopilo-ulitsy-posle-dozhdia> (дата обращения: 01.10.2024).

² Коммунальщики Владивостока ликвидируют последствия очередного ливня // Известия. URL: <https://iz.ru/1564245/2023-08-25/kommunalshchiki-vladivostoka-likvidiruiut-posledstviia-ocherednogo-livnia> (дата обращения: 01.10.2024).

³ В подмосковном Одинцове затопило улицы после мощного ливня // Известия. URL: <https://iz.ru/1549876/2023-07-26/v-podmoskovnom-odintcovo-zatopilo-ulitsy-posle-moshchnogo-livnia> (дата обращения: 01.10.2024).

⁴ Указ Президента РФ от 02.11.2023 № 818 "О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации" // Президент России. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49919> (дата обращения: 01.10.2024).

Актуальность исследования

Немаловажно также обратить внимание на некоторый ряд опубликованных исследований, которые сейчас доступны в открытых источниках и представляют теоретический и практический интерес для исследования влияния озелененных крыш на сокращение ливневых стоков.

Так, в научной публикации «Проектирование зеленых кровель» [8] коллектив, состоящий из студентов и старшего преподавателя кафедры из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках своего комплексного исследования по определению различных экологических аспектов «зеленой» крыши, в том числе провели эксперимент по удержанию осадков с озеленяемой крыши. Эксперимент проводился в августе 2013 года на базе ЖК «Диадема», который расположен в г. Санкт-Петербурге, где были изначально обустроены несколько «зеленых» крыш.

С помощью расходомера, подключенного к водосливу, этой группой исследователей был определен объем выпавших осадков на экспериментальную поверхность «зеленой» крыши 9 августа 2013 г., 14 августа 2013 г. и 20 августа 2013 г. Удержание воды составило в среднем 75 %. Средняя интенсивность выпадения осадков в эти даты августа 2013 года составляла 25 мм в час, а средний сток «зеленой» крыши составлял 6 мм в час. Авторы этой научной публикации делают вывод, что озелененные крыши положительно влияют на уменьшение (сокращение) ливневых стоков.

Также отметим исследование из публикации «Статистический анализ литературных данных по проблеме управления ливневым стоком с помощью использования «зеленых» крыш», опубликованная в 2019 году [9].

В 2023 году вышла научная публикация «Зеленые крыши: перспективы развития в России с учетом атмосферных осадков» [10]. Авторы данной научной работы определили, что «зеленые» крыши способны сократить количество ливневых стоков, а также минимизировать вред от загрязнения гидрообъектов и местных аквоекосистем. Основными параметрами для этого анализа стало количество теплых дней и суммарный объем ливневых стоков. Было определено, что для эффективного (целесообразного) возведения озелененных крыш наиболее подходят Центральный федеральный округ, Дальневосточный федеральный округ, а также Нижегородская область, Ставропольский край и республика Крым. То есть, имеющие наименьший показатель риска, согласно риск-факторному анализу, проведенному авторами. Также в своей работе авторы выделили и менее благоприятные регионы в РФ для возведения «зеленых» крыш, которые должны были влиять на сокращение ливневых стоков, к ним относятся Астраханская и Оренбургская области как регионы, в которых вероятнее всего необходимо будет осуществлять дополнительный искусственный полив, так как эти регионы являются наиболее засушливыми.

Также в 2023 году была опубликована научная работа «Снижение количества дождевого стока с помощью использования технологий зеленых крыш» [11]. Авторы этого исследования создали экспериментальный стенд размером 600×600 мм глубиной 150 мм и с уклоном 5°, а также была спроектирована система водоотвода в емкость для сбора воды, под которой были расположены электронные весы. Подача воды на экспериментальный стенд производилась капельным способом, имитируя дождевое воздействие. Эта капельная оросительная установка симулировала расчетный дождь, характерный для города Санкт-Петербург, что составляло 13 мм осадков. Данная оросительная система работала в течении 5 минут, а объем орошаемой воды за это время составил 4,68 л. В процессе эксперимента с помощью включенного секундомера рассчитывалось количество прошедшей через систему воды в измерительном резервуаре. В первые 12 минут фиксировались результаты каждые 30 сек, а затем период

измерения увеличился до 1 мин, а после 20 мин увеличился до 10 мин. В результате эксперимента было установлено, что средний показатель удерживания стока составил 44 %, хотя на первом этапе измерения (в течении первых 12 мин), когда субстратный слой был абсолютно в сухом состоянии, т. е. на этапе «засухи» субстрат удержал за эти 12 минут уже 16 % воды.

Немаловажной стала и научная публикация «Пути решения проблем отвода ливневых вод на городских территориях» [12], также опубликованная в 2023 году. Это обзорное исследование на тему создания так называемой «зеленой» дождевой инфраструктуры, где авторы выделяют важным средством влияния на эффективное сокращение ливневых стоков, именно «зеленые» крыши. Авторы этой научной публикации отмечают хорошую способность захвата загрязняющих веществ «зеленой» кровлей, которая становится как бы естественным фильтром. «Зеленая» крыша не требует дополнительной свободной площади под ее строительство, а также снижает температуру покрытия зданий, снижает затраты на электроэнергию.

Таким образом, авторы публикации утверждают, что зеленые крыши кроме экологических функций, также отличаются и высокими эстетическими качествами и могут выполнять важные бытовые функции.

Отметим, что в настоящий момент поле отечественных исследований в области вопроса влияния озелененных крыш на сокращение ливневых стоков освещен не так подробно, как в зарубежных исследованиях. Возможно, это связано с тем, что технологии озелененных кровель еще не прижилась в нашей стране и не так широко распространена, как в других странах. Именно поэтому кажется столь важным внимательное изучение опыта, в том числе зарубежных ученых. Например, к опыту европейских коллег, к материалам которых стоит обратиться.

На сегодняшний день такие страны Центральной Европы, как Чехия и Германия, занимают лидирующие позиции в отношении количества, площади и, пожалуй, качества устройства озелененных крыш зданий и сооружений.

Кроме того, именно в Германии по сей день разрабатываются все передовые нормативно-правовые документы, в том числе «Friedrich Linden, Ludenscheid», документ, который, помимо прочего, предлагает методику, позволяющую рассчитать объем сдерживаемого стока «зелеными» крышами (включает правила проектирования, возведения, эксплуатации озелененных кровель и пр.).

Так, в 2015 году сотрудниками Гамбургского технического университета было проведено исследование на тему сокращения излишнего стока за счет озеленения крыш [13].

Учеными были возведены специальные экспериментальные стенды, имитирующие работу слоев «зеленой» крыши. Также была разработана и установка, с помощью которой можно было управлять интенсивностью и частотой выпадения осадков. Эта установка представляла собой большую матрицу, покрывающую площадь 12 м². Под матрицей располагались два экспериментальных стенда, благодаря чему при одинаковом режиме работы матрицы, то есть в совершенно идентичных, специально заданных условиях, располагались одновременно две разные исследуемые системы «зеленой» крыши.

Моделируемый дождевой сток собирался следующим образом: искусственно воссозданные атмосферные осадки сначала проходили в специальный перфорированный лист, затем собирались в водоотводной нише, представляющей собой деревянный лоток, куда и сбрасывался избыток влаги со стендов. Далее вода уходила через выпускное отверстие в мерные цилиндры. С помощью которых впоследствии и определялся объем ливневого стока прошедшего через систему озеленения.

Данное исследование показало, что при ливневом воздействии продолжительностью 15 минут более толстый слой субстрата удерживает больший объем свободной воды, демонстрируя тем самым рост эффективности водонакопления системой озеленения с увеличением толщины ее субстратного слоя. В связи с тем, что гидравлическое воздействие искусственно созданного дождя было управляемым (по продолжительности и интенсивности выпадающей толщины осадков) исследователями также было выявлено, что при более продолжительных (тесты, проводимые в течении 60 минут, в отличие от 15-минутных) и более интенсивных осадках происходило полное обводнение системы и влияние толщины субстратного слоя оказывало гораздо менее значительным в процентном соотношении.

Однако, сформулированные в работе Гамбургских исследователей тезисы базируются на данных всего лишь двух стендов с субстратными слоями толщиной 6 см и 8 см, имеющих в обоих случаях одинаковый состав. То есть разница между ними оказывается незначительной, поэтому закономерно, что результаты показали малое расхождение в полученных опытным путем данных. Вероятно, чтобы определить, какая из данных моделей была бы наиболее эффективна по показателю водонакопления, следовало бы применить стенды с большей разницей в толщине их субстратного слоя. Вполне возможно, что в таком случае исследователям удалось бы получить более явные показатели, с помощью которых можно было бы определить математическую зависимость между выпавшими атмосферными осадками и объемом сдерживаемого дождевого стока озелененной крыши.

Еще одна работа, посвященная ливневым стокам на озелененных кровлях, была опубликована сотрудниками университета Падуи в 2018 году [14]. В средиземноморских странах совершенно иной климат, характеризующийся не только гораздо более высокими температурами, но и отличной от Центральной Европы розой ветров, и соответственно, совершенно иным режимом выпадения осадков, что существенно влияет на процесс возведения и на режим эксплуатации «зеленых» крыш. Если сравнивать климат Италии с условиями нашей страны, то примерное соответствие можно установить с зоной Причерноморья. И хотя здесь совпадение для наших широт очень локально, рассмотрим подробнее опыт коллег из Южной Европы с точки зрения учета объема осадков в модели накопления излишнего ливневого стока.

В рассматриваемой публикации ученые из Падуи создали экспериментальный стенд, принцип работы которого схож с исследованием, которое было проведено гамбургскими учеными. Итальянские исследователи также организовали работу стенда, моделирующего атмосферные осадки. Для этого над стендом с моделью озелененной крыши был установлен резервуар с водой, под которым располагалась перфорированная матрица, создающая капельные осадки, имитирующие естественный дождь. После выпадения искусственных осадков вода собиралась со стенда и уходила в специальную емкость. Но в отличие от схожих экспериментов аналогов, здесь не только под экспериментальным стендом были установлены измерительные приборы, но и под дренажной емкостью. В ходе эксперимента исследователям удалось смоделировать усредненное дождевое воздействие, характерное для Падано-Венецианской низменности.

В результате выяснилось, что сумма водонакопления отдельно каждого из слоев оказывается несколько большей, чем фактическое водонакопление всех слоев как системы. Расчеты показали, что для понимания влагоудерживающей способности всей «зеленой» крыши надо значение общей суммы водонакопления каждого из слоев по отдельности уменьшить на 10 %.

Также не маловажно учесть и исследования из других климатических условий, отличных от Европейских. Рассмотрим исследования ученых исследователей «зеленых» крыш из стран Азии. Так эксперимент, проводимый в 2018 году иранскими учеными, которые также занимались решением вопроса борьбы с излишним стоком и повторным его использованием в

городской среде, а также возможности применения недорогих неорганических материалов для субстрата «зеленых» крыш [15].

Объектами их исследования стали два образца материалов для «зеленой» крыши. Первый образец состоял из битой керамики (кирпича), второй образец состоял из слоя плотных листьев и травы. Исследование проводилось в виде полевого эксперимента в гидравлической лаборатории, с учетом различной интенсивности осадков и в разные периоды повторяемости. Объем накапливаемой воды измерялся тоже в различных условиях.

Авторы исследования создали машину-симулятор дождя с выпускными форсунками на 500 шт., которую использовали для данного эксперимента. Оборудование представляло из себя установку «органного» типа из труб диаметром 110 мм с проделанными в них отверстиями диаметром в 4 мм через каждые 15 мм. При разном режиме интенсивности моделируемого дождя симулятор с различной скоростью пропускал через свои форсунки капли диаметром 3 мм.

Затем иранские исследователи по отдельности провели измерения коэффициента накопления воды в этих двух исследуемых образцах. Результаты экспериментов показали, что с увеличением времени количество воды, хранящейся в «зеленой» крыше, уменьшалось, а количество сточной воды увеличивалось. Исследователи определили, что использование только битого кирпича в субстратном слое дает повышение коэффициента водонакопления. При совмещении слоев из кирпича и травы водонакопление системы в среднем повышается с 60 % до 80 % (сначала залегает толстый слой битого кирпича, а затем сверху слой травы небольшой толщины). Предположим, что на границе слоев с разными принципами водонакопления, а также с различными коэффициентами фильтрации, возможна некоторая задержка отводимой жидкости.

Переместим наше повествование из Азиатского региона на западное побережье Южной Америки в климатическую зону высокогорья Андских гор, которую можно сравнить с нашими регионами Дальнего Востока (Саянские горы) и Камчатки, рассмотрим научную статью ученых в области озеленения крыш из Папского католического университета в Чили [16].

Авторы публикации в 2014–2015 годах провели исследование (результаты были опубликованы в 2018 году), которое показало, что «зеленые» крыши приносят весомую экологическую и гидротехническую пользу зданиям и городской среде. Так авторы исследования отмечают, что для надежного и стабильного использования «зеленых» крыш в засушливом климате необходимо правильно выбрать растительность (посадочный ассортимент), состав субстратного и дренажного слоев для конкретных местных климатических условий, чтобы уменьшить потребность в орошении и сохранить при этом все функционально значимые характеристики кровли.

Для этого ученые создали комплекс открытых испытательных стендов на несколько образцов «зеленых» крыш, представляющих различные конструкции озеленения для исследования их гидрологических функций. Во всех стендах «зеленых» крыш было применено одинаковое озеленение из очитков, также был заложен одинаковый заводской субстрат от производителя. Отличались образцы зеленых крыш только разницей в величине субстратного слоя и в наличии дренажного элемента.

Для исследований Чилийские ученые разработали математическую модель, которая бы подтверждала их экспериментальные выводы. В этой модели, помимо статистики поступления влаги они учли режим испарения воды из субстратного слоя и из дренажного элемента. Кроме того, математически было учтено перемещение воды из дренажного слоя в субстрат и обратно, а также рассчитано влияние солнечной радиации на испарение влаги в разные времена года.

Испытательные стенды исследовались определенное количество дней, в течение которых им необходима была организация орошения. Далее анализировалась эффективность контроля стока воды для всех испытательных стендов. Чилийские ученые связали количественный показатель объема свободной воды, удерживаемой субстратом, с его толщиной и исходной влажностью, а также с величиной и интенсивностью выпадения осадков. Самый низкий по величине коэффициент стока был зафиксирован на испытательном стенде с глубиной субстрата в 20 см и с наличием полноценного дренажного слоя из специализированного водонакопительного материала.

Наиболее коррелирующие результаты расчетной теоретической модели и эксперимента были получены при глубине субстратного слоя в 10 см, тогда как при исследовании стендов глубиной 5 и 20 см наблюдалось отклонение от данных математической модели. Следовательно, такую математическую модель можно использовать для субстратного слоя глубиной 10 см, но для 5 см и 20 см глубины такого слоя не рекомендуется использоваться без поправочных коэффициентов.

В результате исследований авторы статьи пришли к выводу, что значение коэффициента объема стока было прямо пропорционально продолжительности и интенсивности выпадающих атмосферных осадков. Также было подтверждено, что при выпадении осадков в размере 3 мм во всех образцах зеленых крыш стока совсем не наблюдалось, следовательно, сток всегда оставался в озелененной кровле и нигде не уходил.

Таким образом, опираясь на результаты вышеописанного исследования можем сделать вывод, что при толщине субстратного слоя в 5 см система не отличается особой стабильностью в силу неоднородности субстратного, и тем более, растительного слоев. А при мощности субстратного слоя в 20 см субстратный слой перестает в равной доле накапливать воду по всему своему объему.

Формирование расчетной модели озеленяемой крыши

На первоначальном этапе для корректной разработки расчетной модели важно учесть все возможные варианты поступления воды на поверхность озеленения, а затем и в толщу конструкции с последующим изучением распределения температуры в толще субстрата. Поэтому далее для получения независимых от прочих поступлений воды данных нам необходимо рассматривать только объем поступления жидких осадков, в том числе снега, который в определенные периоды зимнего сезона превращается в жидкую составляющую.

Очевидно, что определенные типы озеленения требуют свой минимальный объем воды, необходимый для питания и роста растений. И порой количества накопленной влаги в субстратном или дренажно-накопительном слое может быть недостаточно для поддержания растений в жизнеспособном состоянии. Поэтому одним из наиболее важных мероприятий по уходу за растительным покровом «зеленых» крыш является организация искусственного полива [17]. Однако в рамках данного исследования дополнительное поступление воды за счет учета поливочных мероприятий может значительно усложнить характер движения жидкости в рассматриваемой модели озеленения. Вместе с тем, на настоящий момент в нашей стране требования или рекомендации по организации искусственного полива на озеленяемых крышах отсутствуют. Поэтому не является возможным предугадать, какой именно объем дополнительной воды от полива поступит в толщу конструкций озеленения в каждом отдельно взятом случае. Тем более это невозможно сделать при прогнозировании влияния полива на суммарный объем сокращения ливневых стоков в целом городе или даже регионе. Данную особенность ухода за «зелеными» крышами необходимо учесть при формировании основных показателей расчетной модели.

Исходя из вышеозвученных ограничений, примем в качестве основы для расчетной модели облегченный тип озеленения крыши, а именно экстенсивный тип озеленения. Выбор в пользу такого типа озеленения обусловлен в первую очередь тем, что в соответствии с положениями ГОСТ Р 58785-2020⁵ (далее Национальный стандарт) такой тип озеленения не нуждается в обязательной организации автоматического или ручного полива. Связано это с тем, что экстенсивное озеленение является наиболее устойчивым и неприхотливым типом озеленения крыш [18]. Однако отметим, что согласно положениям Национального стандарта, временный полив все же рекомендуется устраивать, но только в период первоначального ухода после возведения. Далее за счет миграции инвазивных видов растений на поверхность озеленения (при воздействии ветра, от перемещения людей, птиц и насекомых) «зеленая» крыша начинает приобретать свои самоподдерживающиеся и самовосстанавливающиеся свойства. Растительный покров такой «зеленой» крыши начинает динамически видоизменяться, соответствуя составу и разнообразию местных наиболее устойчивых видов растений.

Следующим этапом определим материал дренажного слоя и правила его учета в рассматриваемой расчетной модели озеленения. Как правило, современные дренажные материалы имеют накопительную функцию. Такое накопление крайне важно для долгосрочного обеспечения растений водой при полном или частичном осушении субстратного слоя. Такая накопительная функция в условиях «зеленой» крыши при дефиците влаги в субстратном слое по-настоящему спасает такие крупномерные растения, как кустарники и деревья. Однако, при использовании наиболее неприхотливого посадочного ассортимента такая функция дренажных материалов не является настолько значимой, или необходимость в таком свойстве может и вовсе отсутствовать. Поэтому согласно актуальным положениям Национального стандарта и СП 17⁶ допускается в качестве дренажных материалов использовать мембраны, обеспечивающие эффективный водоотвод, но не имеющие накопительную функцию.

Наиболее распространенной и доступной для приобретения в нашей стране является дренажная мембрана «Planter Geo» (Плантер). Данную дренажную мембрану уже длительное время производит отечественная компания АО «ТЕХНОНИКОЛЬ» (далее Технониколь). Изначально данная мембрана и ее аналоги как правило использовались исключительно для подземных сооружений в качестве защитного и/или водоотводящего слоя. Однако согласно положениям общедоступных стандартов, технических листов и прочих методических указаний Технониколь допускается и рекомендуется использовать мембраны «Planter Geo» в том числе в качестве дренажного слоя в конструкции озеленяемых крыш зданий и сооружений. Примем в качестве материала дренажного слоя расчетной модели именно эту дренажную мембрану. Тогда в формируемой расчетной модели объем накопления дренажным слоем учитывать не будем, в силу отсутствия накопительных свойств у принятой мембраны.

Сформируем в общем виде формулу предельного объема водонакопления «зеленой» крыши (1):

$$V_{оз} = \sum_{осн}^{оз} V_{сл} = V_{ор} + V_{сб} + V_{рст} \rightarrow V_{оз} = V_{сб}, \quad (1)$$

⁵ ГОСТ Р 58875-2020 "Зеленые" стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-05-28 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Изд. официальное — Москва: Стандартинформ, 2020 — 54 с.

⁶ СП 17.13330.2017 Кровли: актуализир. ред. СНиП II-26-76: дата введения 2017-05-31 — Москва: Минстрой России, 2017 — 49 с.

где $V_{др}$ — объем накопления воды в дренажном слое, л; $V_{сб}$ — объем накопления воды в субстратном слое, л; $V_{рст}$ — объем накопления воды в растительном слое, л.

Так, в соответствии с формулой (1) общая предельная величина объема водонакопления озеленяемой крыши равна суммарному водонакоплению всех слоев озеленения, в которых может накапливаться жидкость. Такими слоями, в свою очередь, являются субстратный, дренажный и растительный слой [19]. Исключим из конечного вида формулы (1) объем водонакопления за счет дренажного слоя, так как принятая для расчетной модели синтетическая дренажная мембрана, как уже ранее было отмечено, не имеет накопительных свойств.

Объем накопления воды в растительном слое достигается за счет поглощения осадков растениями. Поглощенная таким образом вода далее участвует непосредственно в росте и развитии растений, а также в процессе эвапотранспирации (испарении с поверхности растительных покровов) [20]. В связи с тем, что данный процесс водонакопления непостоянен и динамика таких запасов неоднородна, пренебрежем таким объемом водонакопления. Кроме того, основанием для исключения данной составляющей накопления может служить выбор посадочного материала. Для экстенсивного типа озеленения подходят различные виды растений: седумы (очитки), однолетники и многолетники, злаковые и прочее. Наиболее неприхотливым и устойчивым в качестве основного посадочного материала в связке с местными инвазивными видами являются именно седумы [21]. Кроме того, некоторые виды седумов могут значительно влиять на эвапотранспирации всей системы озеленения [22; 23]. Однако такое озеленение не будет отличаться заметным водонакоплением [24], в силу того, что доля накопления воды субстратным слоем и дренажной системой будет во много раз выше. Примем седумное озеленение в формируемой расчетной модели и исключим из формулы (1) объем водонакопления за счет растительного слоя.

Таким образом, согласно конечному виду формулы (1) предельный суммарный объем водонакопления принятой расчетной модели озеленения будет равен предельному объему водонакопления субстратным слоем.

Определение предельного водонакопления субстратным слоем

Максимальное удельное водонакопление субстратным слоем на один квадратный метр обычно при проектировании рассчитывается путем перемножения максимальной влагоемкости и высоты субстратного слоя [25]. При этом максимальная влагоемкость, как правило, учитывается по паспорту производителя, а не исходя из данных независимых лабораторных испытаний. Однако ранее производимое авторами исследование содержит техническую гипотезу о непостоянном характере водонакопления субстратным слоем.⁷ Так, при расчете суммарного объема водонакопления субстратным слоем предлагается учитывать накопление в двух характерных зонах. В первой зоне, а именно в зоне «полного насыщения», отмечается как раз прямая линейная зависимость между высотой субстрата и его максимальным водонакоплением. Однако со второй, «переходной» зоны эта зависимость перестает быть линейной и показатель влагоемкости начинает уменьшаться с увеличением глубины субстрата.

Отразим графически гипотетическую модель накопления на рисунке 1. Так, для экстенсивного типа озеленения профиль накопления будет представлен двумя геометрическими фигурами: прямоугольником в зоне «полного насыщения» и прямоугольной трапецией в «переходной» зоне. Также обратим внимание на то, что сумма площадей данных фигур в

⁷ Богачев А.В. Исследование влияния "зеленых" крыш на сокращение ливневых стоков в г. Туле: Магистерская диссертация: 08.04.01 / Богачев Алексей Вячеславович — Москва, 2023. С. 103.

пределах высоты субстратного слоя будет равна предельному объему водонакопления субстратом (см. (5)). Так как высота зоны «полного насыщения» постоянна и составляет примерно 1 см, а накопление в данной зоне не сокращается по высоте, то отразим объем накопления субстратом в первой зоне (V_1) в виде формулы (2).

Профиль накопления второй зоны состоит из двух оснований и переменной высоты, которая соответствует действительной толщине субстрата ниже зоны «полного насыщения». Основание, примыкающее к первой зоне (зоне «полного насыщения»), равно полному показателю влагоемкости (W), в свою очередь, противоположное имеет величину равную произведению полной влагоемкости (W) и поправочного коэффициента (n). Величину поправочного коэффициента определим методами линейной интерполяции (см. (3)), исходя из утверждения, что при высоте субстратного слоя (h) в 16 см, предельная влагоемкость (W) сокращается на 30 %.⁷ Далее по формуле определения площади прямоугольной трапеции определим объем накопления во второй зоне (V_2) (см. формулу 4). И отразим формулу суммарного объема водонакопления субстратным слоем в пределах всех характерных зон накопления (см. (5)):

$$V_1 = 0,1 \cdot W, \quad (2)$$

$$n = \frac{(0,1 \cdot h - 0,1) \cdot (0,7 - 1)}{(1,6 - 0,1)} + 1 = 1,02 - 2 \cdot h, \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{(W + nW)(h - 0,1)}{2} = W(-0,101 + 10,2h - 10h^2), \quad (4)$$

$$V_{сб} = V_1 + V_2 = W(-0,001 + 10,2h - 10h^2), \quad (5)$$

где W — максимальная влагоемкость по массе, %; h — высота субстратного слоя, м; n — поправочный коэффициент.

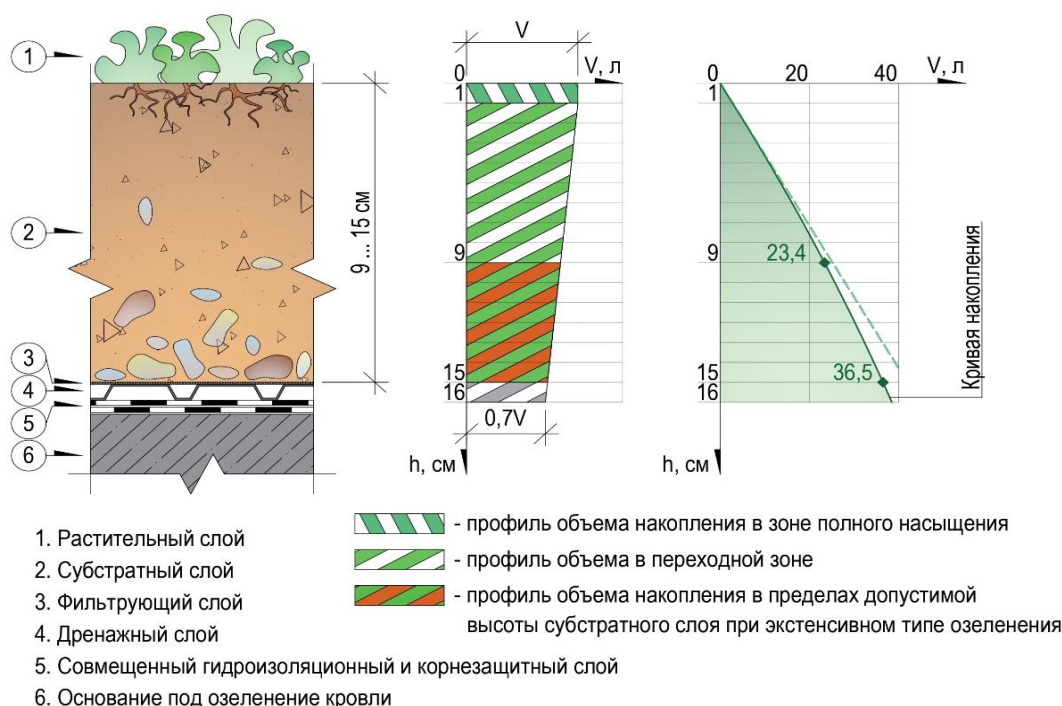


Рисунок 1. Конструктивные слои озеленяемой кровли экстенсивного типа с графиком зависимости объема накопления субстратным слоем от его толщины (разработано авторами)

Таким образом, полученную формулу (5) можно представить графически в виде кривой накопления (рис. 1). При экстенсивном типе озеленения при минимальной толщине субстратного слоя (9 см) объем накопления составит порядка 23,4 литра на квадратный метр озеленения, а при максимальной высоте (15 см) — 36,5 литра на метр квадратный.

Предварительное районирование территории по количеству осадков

Произведем оценку принятой выше расчетной модели на основании распределения среднесуточного количества осадков на определенной территории. Примем в качестве исследуемого региона такую территорию, которая бы обладала следующими особенностями: высокоразвитой материально-технической базой и устойчивым экономическим благосостоянием. Кроме того, выбор в пользу исследуемого региона должен подтверждаться наличием регулярных случаев временных подтоплений улиц и прочих рекреационных зон урбанизированных территорий. Таким образом, наиболее подходящим регионом является Центральный федеральный округ Российской Федерации (далее ЦФО или ЦФО РФ). Территории населенных пунктов ЦФО с высокой степенью герметизации свободных площадей искусственными покрытиями в том числе регулярно подвергаются локальным подтоплениям во время пиковых воздействий ливня, о чем упоминалось ранее при обосновании актуальности исследования.

Данные о толщинах среднесуточного слоя жидких осадков для 55 населенных пунктов ЦФО РФ (включая г. Москву и 18 Административных центров субъектов ЦФО) примем согласно табличным данным из методического пособия НИУ ВОДГЕО.⁸ Отразим полученную выборку данных графически на рисунке 2. На карте (рис. 2) зададим шаг разделения на климатические районы по показателю нормативного среднесуточного слоя осадков, равняющемуся 2 мм. Отметим, что положение границ районов примем условно исходя из превышения толщин между ближайшими населенными пунктами. На сформированной карте видно, что концентрация наиболее высоких среднесуточных значений осадков преобладает в юго-западной и западной частях ЦФО (а именно в Брянской, Калужской, Курской, Московской и Смоленской областях), значения с наиболее низкими показателями толщин жидких осадков отмечаются в юго-восточной и восточной частях (Воронежская, Ивановская, Костромская, Рязанская и Тамбовская области).

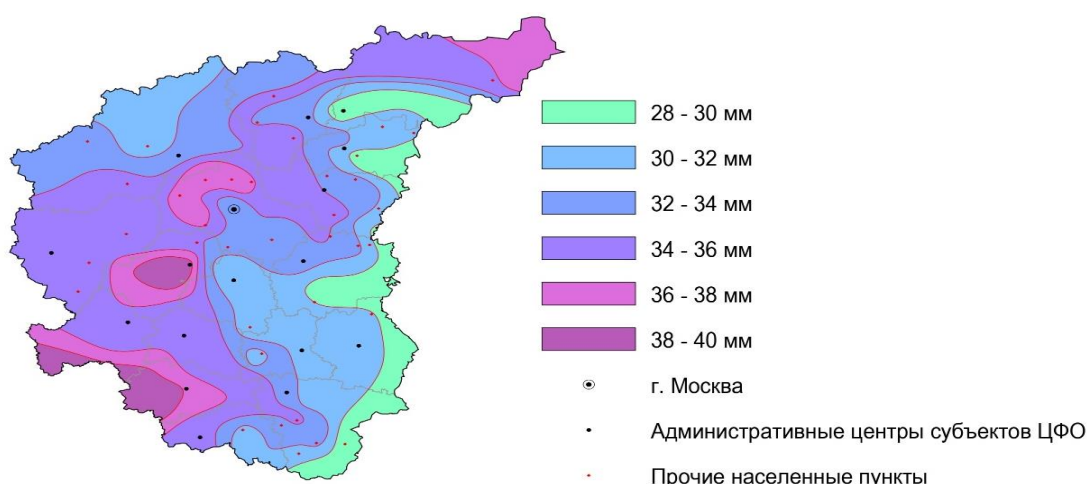


Рисунок 2. Карта распределения табличных нормативных толщин среднесуточного слоя осадков для ЦФО РФ (разработано авторами)

⁸ Литература // Argel. URL: <https://www.vo-da.ru/book/guide> (дата обращения: 01.10.2024).

Формирование расчетной схемы при пиковом значении осадков

Для того, чтобы определить основные показатели расчетной схемы максимального водонакопления субстратным слоем при пиковом значении осадков, необходимо произвести анализ водного баланса в толще субстрата. Так, за некоторый длительный отрезок времени (T) мы можем наблюдать периоды, как дождливые, так и с отсутствием жидких осадков. В периоды без осадков вода будет испаряться в атмосферу с поверхности субстрата, тем самым уменьшая объем воды в толще субстратного слоя (см. (6)). Предположим, что скорость поступления воды на поверхность «зеленой» крыши от дождя ($v_{осад}$) будет примерно соответствовать и равняться скорости испарения в период отсутствия дождей ($T - t_{осад}$). Также исходя из того, что среднее количество дождливых дней за летний месяц для исследуемого региона составляет порядка 14–16 дней⁹, то есть половину календарных дней месяца, получим, что в оставшиеся дни без осадков будет происходить испарение воды.

Для того, чтобы конструкции «зеленой» крыши наиболее эффективно сдерживали ливневый сток, необходимо, чтобы объем суммарного испарения накопленной воды за единицу времени превышал или был равен объему поступающих осадков за то же время (см. (7)).

$$V_{сток}(T) = (v_{осад} \cdot t_{осад} - v_{осуш} \cdot (T - t_{осад})) - V_{оз}, \quad (6)$$

$$v_{осад} \cdot t_{осад} \leq v_{осуш} \cdot (T - t_{осад}) + V_{оз}, \quad (7)$$

где $v_{осад}$ — количество осадков за единицу времени, л/сут; $v_{осуш}$ — количество испаренной воды за единицу времени, л/сут; T — полное расчетное время наблюдения; $t_{осад}$ — длительность дождей за время наблюдения.

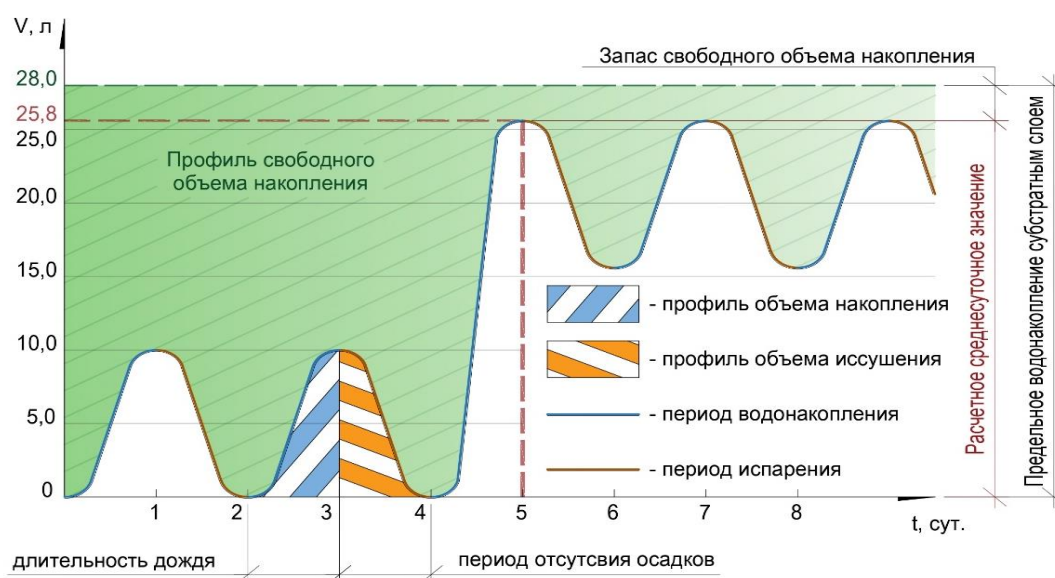


Рисунок 3. Расчетная схема накопления жидких осадков субстратным слоем (разработано авторами)

При этом необходимо учесть, что мощность ливневого воздействия в отдельно взятые дни может значительно разниться между собой. Тогда наиболее неблагоприятный случай для данной модели водного баланса будет наблюдаться при суточном годовом максимуме (рис. 3).

⁹ Климат мира // Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate.php?id=27333> (дата обращения: 01.10.2024).

Расчетные суточные значения максимального слоя жидких осадков примем согласно рекомендациям из вышеупомянутого методического пособия (см. (8)).

$$H_p = H_{cp} \cdot (1 + c_v \cdot \Phi), \quad (8)$$

где H_{cp} — нормативное среднесуточное количество жидких осадков, мм; c_v — коэффициент вариации; Φ — см. табл. Л1, М1.¹⁰

Для гидравлического расчета систем поверхностного водоотвода, как правило, используется значение наибольшего возможного суточного слоя осадков за один год, то есть однократного пикового годового превышения (обеспеченность такого превышения составляет 63 %).¹⁰ По аналогии учтем в исследуемой модели также годовое превышение, как наиболее неблагоприятный расчетный случай, не выходящий за пределы оптимальной (статистически оправданной) вероятности возникновения.

Создание карты оптимального применения

В основу методики районирования эффективности принятой расчетной модели относительно климатических условий рассматриваемого региона примем следующую формулу (9):

$$H_p^{0,63} \leq V_{oz} \rightarrow H_p^{0,63} \leq V_{cb}, \quad (9)$$

где V_{oz} — суммарный объем накопления воды озеленяемой кровлей, л; V_{cb} — объем накопления воды в субстратном слое, л.

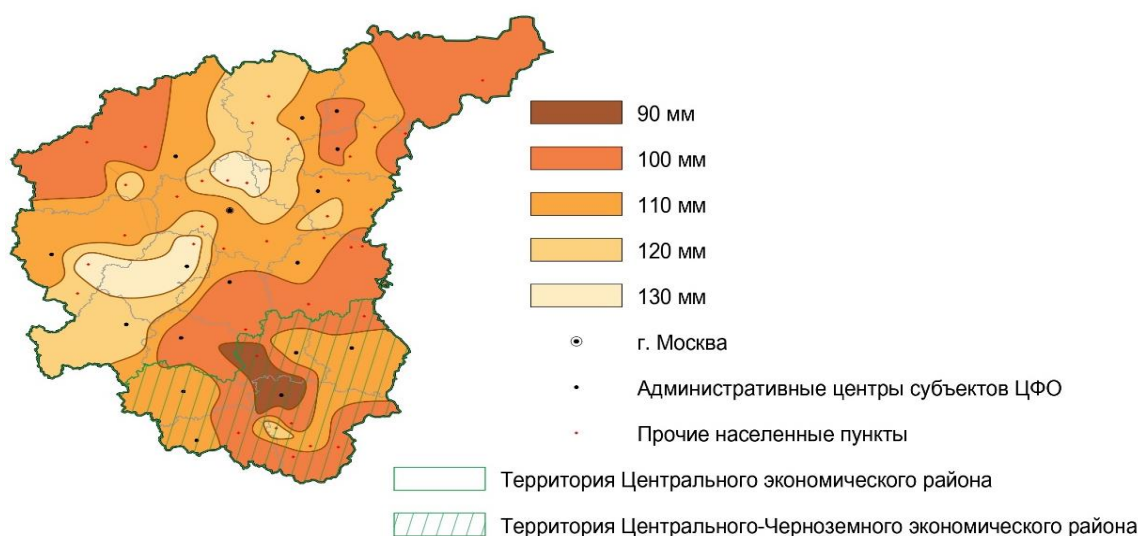


Рисунок 4. Карта распределения оптимальной толщины субстратного слоя для ЦФО РФ (разработано авторами)

Так, согласно данной формуле, деление на районы будет производиться на основании максимального суммарного объема накопления жидких осадков конструкциями озеленяемой крыши, а значит будет напрямую зависеть от толщины субстратного слоя. Также получим, что при полном удержании крышей осадков объем ливневого стока будет либо незначителен, либо равен нулю. Тогда в качестве показателя, отражающего оптимальность применения «зеленых» крыш, как эффективного средства сокращения объема излишнего ливневого стока, примем

¹⁰ Литература // Argel. URL: <https://www.vo-da.ru/book/guide> (дата обращения: 01.10.2024).

именно высоту субстрата. Произведем деление на районы по минимальной толщине возможного субстратного слоя. Примем шаг деления кратным 10 мм высоты субстрата и отразим полученные результаты графически на рисунке 4. Также дополнительно представим на полученной карте разделение ЦФО на экономические районы.

Заключение

Таким образом, взяв в основу расчета наиболее вероятное максимальное поступление жидких осадков и минимально необходимый состав конструкций озеленяемой крыши, отличающийся доступностью по себестоимости и по возможности приобретения (закупки) всех материалов, получим, что самые рациональные и экономически выгодные условия применения «зеленых» крыш с точки зрения эффективного метода сокращения излишнего ливневого стока наблюдаются в двух субъектах Центрального-Черноземного экономического района Российской Федерации. А именно на некоторых территориях Воронежской и Липецкой областей. Графически определено, что наиболее оптимально озеленение крыш для управления ливневым стоком рекомендуется использовать на территориях: Измалковского и Становлянского муниципальных округов; Долгоруковского, Елецкого, Задонского, Тербунского, Хлевенского и Хохольского районов, а также городов Воронеж и Елец.

Также стоит добавить, что для дальнейшей корректировки и улучшения приведенной расчетной модели необходимо также учесть влияние от таяния снега, искусственного полива и прочих вариантов дополнительного поступления воды. Кроме того, для подтверждения полученных данных авторами планируется апробация разработанных исследований в рамках натурного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теличенко, В.И. Апробация требований к устройству «зеленых» крыш в городской застройке / В.И. Теличенко, А.А. Бенуж, И.В. Мочалов, А.В. Богачев // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 9. — С. 12–17.
2. Дьячкова, О.Н. Применение инновационных технологий озеленения при строительстве детских садов / О.Н. Дьячкова // Архитектура во времени и пространстве-2022: Материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 28 апреля 2022 года. — Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. — С. 21–23.
3. Чернова, Е.Д. Архитектура «зеленых» крыш и их энергоэффективность / Е.Д. Чернова, О.С. Гамаюнова // Инженерные исследования. — 2023. — № 2(12). — С. 33–41.
4. Киреева, Т.В. Зеленые кровли бионической архитектуры России / Т.В. Киреева // Ландшафтная архитектура и формирование комфортной городской среды: Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции, Нижний Новгород, 15 марта 2023 года / Отв. редактор О.П. Лаврова. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. — 2023. — С. 3–8.

5. Бенуж, А.А. Исследование роли «зеленых» крыш для устойчивого развития городов / А.А. Бенуж, А.Д. Пеньшин, Д.В. Сиволин // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Том 2. — Москва: Издательство АСВ, 2021. — С. 12–19.
6. Бенуж, А.А. Влияние озеленения кровли на энергоэффективность здания / А.А. Бенуж, А.В. Богачев // Academia. Архитектура и строительство. — 2021. — № 2. — С. 117–122.
7. Rutten, A. Les jardins suspendus de Babylone / A. Rutten, J. Lacam // Revue Horticole. — 1949. — P. 88–92.
8. Далинчук, В.С. Проектирование зеленых кровель / В.С. Далинчук, Д.А. Власенко, С.А. Старцев // Инновационное развитие. — 2017. — № 4(9). — С. 12–18.
9. Красногорская, Н.Н. Статистический анализ литературных данных по проблеме управления ливневым стоком с помощью использования зеленых крыш / Н.Н. Красногорская, С.А. Мусина, Л.Ф. Хасанова, А.И. Щелчкова // НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ОТКРЫТИЯ 2019: сборник статей X Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 июня 2019 года. — Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. — С. 68–72.
10. Кадысева, А.А. Зеленые крыши: перспективы развития в России с учетом атмосферных осадков / А.А. Кадысева, С.В. Максимова, О.В. Сидоренко, В.В. Миронов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/79SAVN223.pdf>.
11. Вернов, М.В. Снижение количества дождевого стока с помощью использования технологии зеленых крыш / М.В. Вернов, Д.Д. Заборова // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 03–09 апреля 2023 года / Печатается по решению Совета по издательской деятельности Ученого совета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Том Часть 1. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. — С. 326–328.
12. Карташова, Н.П. Пути решения проблем отвода ливневых вод на городских территориях / Н.П. Карташова, Е.В. Шерматова // Интеграция и устойчивость зеленой инфраструктуры: материалы Международной молодежной научной школы-конференции, Воронеж, 24 марта 2023 года. — Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2023. — С. 49–54.
13. Palmaricciotti, G. Lab-based study to analyse the influence of parameters on the water retention capacity of green roofs / G. Palmaricciotti, J. Patzke, S. Hellmers, N. Manojlovic, P. Fröhle // UDM2015. 10th International Urban Drainage Modelling Conference. September 20–23, Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada, 2015 — 5 p.
14. Bettella, F. Drainage flux simulation of green roofs under wet conditions / F. Bettella, V. D'Agostino, L. Bortolini // Journal of Agricultural Engineering 2018; XLIX:838. — 2018. — P. 242–252.

15. Nazemi, H. The effects of different materials of green roofing on the quantity and quality of stored and drainage water by using simulated rainfall setup / H. Nazemi, F. Misaghi, A. Ghahremanzadeh // *Advances in Environmental Technology*. — 2021. — № 1. — P. 29–36.
16. Herrera, J. Using a Hydrological Model to Simulate the Performance and Estimate the Runoff Coefficient of Green Roofs in Semiarid Climates / J. Herrera, G. Flamant, J. Gironás, S. Vera, C.A. Bonilla, W. Bustamante, F. Suárez // *Water* 2018, 10, 198.
17. Sysoeva, E. Design of “Green” Roofs of Extensive Type in Various Climatic Zones of Russia / E. Sysoeva, I. Morozov // *Technological Advancements in Construction*. Vol. 180. — Cham: Springer Verlag, 2022. — P. 99–107.
18. Киреева, Т.В. Классификация зеленых и эксплуатируемых кровель / Т.В. Киреева // *Приволжский научный журнал*. — 2022. — № 3(63). — С. 140–146.
19. Сысоева, Е.В. Влияние «зеленых» крыш на снижение ливневых стоков / Е.В. Сысоева, А.В. Богачев // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2023. № 2. С. 81–89.
20. Понькина, Е.В. Подходы к оценке потенциальной эвапотранспирации / Е.В. Понькина, А.С. Россова, К.Ю. Герпсумер [и др.] // *Труды семинара по геометрии и математическому моделированию*. — 2019. — № 5. — С. 125–133.
21. Nawaz, R. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate / R. Nawaz, A. McDonald, S. Postoyko // *Ecological Engineering*. — 2015. — № 82. — P. 68–80.
22. Starry, O. Photosynthesis and water use by two Sedum species in green roof substrate / O. Starrya, J.D. Lea-Cox, J. Kim, M.W. van Iersel // *Environmental and Experimental Botany*. — 2014. — № 107. — P. 105–112.
23. Starry, O. Parameterizing a Water-Balance Model for Predicting Stormwater Runoff from Green Roofs / O. Starrya, J. Lea-Cox, A. Ristvey, S. Cohan. // *Journal of Hydrologic Engineering*. — 2016. — № 21(12). — p. 30.
24. Bortolini, L. Hydrological Behaviour of Extensive Green Roofs with Native Plants in the Humid Subtropical Climate Context / L. Bortolini, F. Bettella, G. Zanin // *Water* 2021, 13, 44.
25. Sysoeva, E. The influence of green roofs on reducing storm runoff / E. Sysoeva, A. Bogachev // *E3S Web of Conferences* 410, 04010 (2023).

Sysoeva Elena Vladimirovna

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

E-mail: SysoevaEV@mgsu.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=755880

Bogachev Alexey Vyacheslavovich

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

E-mail: BogachevAV@mgsu.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1251350

Zoning of the Central Russian by the efficiency of green roofs in reducing excessive storm runoff

Abstract. Due to the increased attention of the public and the government of the Russian Federation to environmental issues and their solution using modern tools and techniques, this paper discusses the effectiveness of using «green» roofs as a sustainable means of combating the problems of organizing and diverting the volume of storm drains in Russian cities. The possibility of such a study is explained by the fact that the design of green roofs consists of several layers, almost each of which is able to retain water, thereby reducing the total volume of rainwater runoff, which, in turn, would reduce the load on the sewer system and improve the environmental well-being of the urban environment. First of all, in order to predict the feasibility of installing green roofs in different cities of our country, the authors provide a description of the calculation model of such a greened roof. The authors chose the most easily erected and low-maintenance type of landscaping that meets all standards for the construction of green roofs, and also laid the most affordable materials. In the article, a methodology was developed to determine the volume of water accumulation by a green roof with specified parameters. The results of the calculations were correlated with the indicators of precipitation in different regions of the Russian Federation. As a result, a list of territories was formed in which the use of green roofs (including at peak precipitation values) would be most effective, and a map of the distribution of the optimal thickness of the substrate layer for the studied region was developed and reflected.

Keywords: green roof; roof greening; storm runoff; runoff reduction; substrate; drainage; map