



Research Article

Received: December 10, 2024

Accepted: December 24, 2024

Published: December January 1, 2025

ISSN 2304-6295

## Impact of vegetation layer on external heat transfer characteristics

Korniyenko, Sergey Valeryevich<sup>1\*</sup>  Tkachev, Makar Sergeevich<sup>2</sup>  Tkachev, Sergei Andreevich<sup>3</sup>  

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; svkorn2009@yandex.ru (K.S.V.); egor.brehov@yandex.ru (B.E.M.)

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; makar.tkachev@mail.ru (T.M.S.)

<sup>3</sup> StroyPromExpertiza LLC, Volgograd, Russian Federation; tsaexp@gmail.com (T.S.A.)

Correspondence: \* email [svkorn2009@yandex.ru](mailto:svkorn2009@yandex.ru); contact phone [+79884912459](tel:+79884912459)

### Keywords:

Green construction; Green roof; Plant layer; Substrate; External heat transfer coefficient (EHTC); External heat transfer resistance (EHTR); Heat flux density (HFD)

### Abstract:

**The object of research** is a natural physical model of a green roof, which is a fragment of the surface layer of soil with landscaping in the form of a grassy layer on top of the substrate. The climate type is Dfa according to the Köppen classification. **Method.** Field thermal tests of the object were carried out by the "additional wall" method in the transition (autumn) period of the year. All control tests were performed within 5 days, recording parameters every 5 minutes. The equipment provides high measurement accuracy: for heat flow is plus minus 6%, for temperature is plus minus 0.2%. The measurement process was under control. **Results.** It has been experimentally established that fluctuations in heat flux and temperature on the surface with the plant layer are complex, due to daily cycles. It has been proven that the plant layer noticeably smoothes the temperature wave formed due to external air temperature fluctuations. The coefficient of smoothing of temperature fluctuations is 2.5–3.0; therefore, the surface layer of the substrate and the vegetable layer are in the zone of active fluctuations. It was experimentally confirmed that the air temperatures at different measurement points almost coincide, which excludes the influence of other factors on the temperature regime of the studied fragment. For the first time, the value of the external heat transfer coefficient (from external surface to external air) for green surface is 14.6 W/(sq.mxK) was established. The external heat transfer resistance for green surface exceeds the standard value by 1.7 times. This can be explained by the fact that vegetation creates additional resistance to convective heat transfer compared to surfaces without landscaping. The obtained results make it possible to more accurately calculate the external heat transfer of landscaped roofs.

## 1 Introduction

По данным Международного энергетического агентства (IEA), на эксплуатацию зданий, включая отопление и охлаждение, приходится около 30% мирового конечного потребления энергии. На тепловой комфорт помещений в значительной степени влияют поток явной теплоты и аккумулирование энергии строительными материалами и конструкциями [1]. Энергоэффективность зданий напрямую связана с тепловым режимом наружных ограждающих конструкций, в частности, крыш. Исследования показывают, что температура кровли может повышаться до 50–60 °С из-за воздействия солнечного излучения [2]. Учитывая, что крыши занимают примерно 20–25% общей площади территории города [3], системный подход к их



проектированию, строительству и эксплуатации может существенно снизить температуру воздуха в мегаполисах.

Для решения вышеуказанных задач обычно используют различные подходы пассивного регулирования теплового режима с помощью крыш: а) повышение уровня теплоизоляции; б) повышение тепловой инерции; в) применение солнцезащитных покрытий; г) озеленение крыш [4].

В зданиях с повышенным уровнем теплоизоляции экономия энергии достигается в основном в отопительный период. Существенное повышение уровня теплоизоляции зданий здесь достигается за счет применения высокоэффективных теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций. Однако в этом случае возрастает влияние теплотехнически неоднородных участков ограждений – краевых зон [5]–[7]. Это увеличивает не только дополнительные теплотери через теплозащитную оболочку в зимний период, но и теплопоступления в летний период [8]–[11].

Повышение тепловой инерции ограждающих конструкций не только выравнивает колебания температуры и теплового потока в толще ограждений, но и способствует их задержке во времени [12]–[14]. Вместе с тем, анализ энергопотребления зданий в разных городах показывает, что в зданиях с высокой тепловой инерцией снижается потребление энергии на отопление в условиях теплого климата, но при этом возрастают нагрузки на охлаждение [15]. Кроме того, такое решение ухудшает тепловую адаптивность в жилых помещениях в холодную зиму и жаркое лето в климатических зонах России [16], [17].

В ряде случаев кровли покрывают светоотражающими красками белого или светло-серого цвета [18], [19]. Такие покрытия характеризуются достаточно высокими значениями коэффициента отражения солнечного излучения (0.61 и более), что позволяет им эффективно отражать большую часть падающего солнечного излучения обратно в сторону небосвода в светлое время суток. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению суммарного солнечного излучения, падающего на здания. Вместе с тем, высокие значения коэффициента теплового излучения (0.9 и выше) могут увеличить потребление энергии на отопление в зимний период [20]–[22]. Тем не менее, обзор литературы показывает, что общая экономия затрат на электроэнергию, связанная с внедрением «белых» крыш, достигается в большинстве климатических условий [23], [24].

Зеленые крыши покрыты слоем растительности, расположенным поверх питательной среды – субстрата. Растения играют важнейшую роль в преобразовании части солнечного излучения в скрытую теплоту посредством таких важнейших процессов, как фотосинтез и транспирация. В зависимости от типа озеленения следует различать интенсивные, полунтенсивные и экстенсивные зеленые крыши. Между несущей конструкцией и субстратом обычно расположены гидроизоляционная мембрана, противокорневой барьер, дренажный слой и теплоизоляция [25]. Такая конфигурация крыши создает естественную среду с многочисленными преимуществами по сравнению с традиционными решениями [26]–[28]. Эти преимущества включают очистку воздуха на урбанизированных территориях [29]–[32], смягчение эффекта городского теплового острова [33]–[35], увеличение срока службы крыши [36], снижение уровня шума [37], снижение теплового стресса [38], энергосбережение [39], [40], снижение объема ливневых стоков [41], [42]. Зеленые крыши биомиметичны. Для решения проблемы энергосбережения в зданиях применение зеленых крыш эффективно как в летний, так и в зимний периоды года [43].

В условиях умеренно-континентального климата в переходные периоды года теплотехнические характеристики зеленых крыш недостаточно изучены.

Для теплотехнических расчетов зеленых крыш необходимо знать характеристику теплообмена их наружной поверхности. Применение стандартных значений этой характеристики, полученной для наружных стен или покрытий, может привести к погрешностям результатов расчета. Анализ конструктивных особенностей массивных озелененных крыш показывает, что исследование процессов теплообмена удобно проводить на природных физических моделях крыш. Такой моделью может быть часть озелененной поверхности территории. Наибольший интерес представляет изучение теплообмена в активном слое тепловых колебаний (температур и тепловых потоков), включая растительность и поверхностную часть субстрата, поэтому в процессе исследования следует тщательно контролировать соответствие модельных и реальных слоев крыши. Применение природных физических моделей снижает трудоемкость исследований, сокращает их продолжительность, существенно уменьшает стоимость материально-технических затрат на проведение экспериментов, повышает безопасность экспериментальных исследований.



Целью данного исследования является определение влияния растительного слоя на характеристики теплообмена озеленяемых крыш.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что впервые определена характеристика теплообмена на природной физической модели зеленых крыш, позволяющая по-новому взглянуть на то, как растительный слой совместно с субстратом влияют на теплообменные характеристики конструкций. Полученные результаты подтверждают теплотехнические преимущества зеленых крыш. Ожидается, что результаты данного исследования будут полезны архитекторам и инженерам для поиска устойчивых экосистемных конструктивных решений в умеренно-континентальном климате.

## 2 Materials and Methods

Метод, использованный в данном исследовании, включает в себя комплекс измерительных процедур, позволяющий *in-situ* определить характеристику теплообмена озелененных поверхностей. Более подробная информация представлена в следующих разделах.

### 2.1 The research object

Объектом исследования является природная физическая модель зеленой крыши, представляющая собой фрагмент поверхностного слоя грунта с экстенсивным озеленением в виде травянистого слоя поверх субстрата в климатических условиях Волгограда, Россия (48°42'42" с. ш. 44°30'50" в. д.).

Климат Волгограда – умеренно-континентальный, определяемый как «Dfa» согласно международной классификации климата Кӧрпен [44]. Эта характеристика обозначает снежные (D), полностью влажные (f) и жаркие летние (a) условия ( $T_{\min} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Этот климат характеризуется умеренно холодной зимой и жарким летом. По итогам многолетних наблюдений средняя за год температура воздуха в Волгограде составляет 8.7 °С. Самый холодный месяц – февраль со средней температурой –6.9 °С. Самый теплый месяц – июль, его среднемесячная температура 24.2 °С. Среднее количество осадков – 267 мм в год. Зима мягкая, с частыми оттепелями, лето жаркое и долгое, во все времена года возможны резкие перепады температуры.

### 2.2 The research method

Натурные теплотехнические испытания указанного объекта проводились путем измерения и регистрации плотности теплового потока, проходящего через теплообменные поверхности растительного слоя и субстрата, а также температур таких поверхностей и окружающего их наружного воздуха.

Метод измерения плотности теплового потока основан на регистрации перепада температуры на «дополнительной стенке», устанавливаемой на испытываемом фрагменте. В данном эксперименте использован многоканальный измеритель-регистратор плотности теплового потока и температуры ИТП–МГ4.03 «Поток». Указанный цифровой прибор позволяет достаточно быстро и точно определить искомые величины экологически безопасным методом неразрушающего контроля, что особенно важно при обследовании эксплуатируемых объектов, не допускающем их частичного или полного разрушения.

Прибор состоит из автономных программируемых десятиканальных модулей и электронного блока, предназначенного для программирования и сбора информации, накопленной модулями.

Прибор обеспечивает выполнение измерений каждым из модулей одновременно по десяти измерительным каналам в оперативном режиме, а также в режиме наблюдения с автоматической регистрацией тепловых потоков, температуры воздуха через интервалы времени, установленные пользователем. Интервал времени в данном эксперименте составляет 5 мин. Прибор оснащен функцией передачи данных на ПК и часами реального времени. Получаемая в процессе измерений информация автоматически архивируется и маркируется датой и временем измерения. Предусмотрена возможность графического отображения контролируемых параметров во времени, распечатка архивированной информации в виде таблиц.

Все теплотехнические испытания проведены в переходный (осенний) период года, с 29 сентября по 04 октября 2023 года. Выбранная продолжительность эксперимента (около 5 суток) соответствует стандартным требованиям исследования процесса теплообмена на озелененных поверхностях [45], [46].

Для возможности усреднения результатов теплотехнических испытаний датчики теплового потока и температур были размещены в поверхностном слое субстрата в трех различных точках (рис. 1, а). Регистрация температур воздуха осуществлялась с помощью датчиков, установленных на некотором удалении от поверхности грунта. Для защиты датчиков от неблагоприятных атмосферных воздействий был предусмотрен ящик с перфорированными стенками, обеспечивающими необходимое движение воздуха. Для экранирования направленного солнечного излучения использовалась мембрана из фольги. Для оценки влияния ящика на показания датчиков был установлен дополнительный температурный датчик у его наружной поверхности (рис. 1, б).

Фото размещения датчиков тепловых потоков и экспериментальной установки в сборе показаны на рис. 1.



a



b

**Fig. 1 – Location of temperature and heat flux density sensors (a) and general view of the device (b)**

### 2.3 Metrological parameters of equipment

Метрологические характеристики оборудования приведены в табл. 1.

**Table 1. Metrological parameters of equipment**

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений: каналов плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> каналов температуры, °С	от 10 до 999 от –30 до 100
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения плотности теплового потока, %	±6
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения температуры, °С (в рабочем диапазоне от –30 до 80 °С)	±0.2
Коэффициент преобразования датчиков теплового потока, Вт/(м <sup>2</sup> ·мВ), не более	50

Применяемое оборудование в целом обеспечивает необходимую точность измерений: для теплового потока ±6%, для температуры ±0.2%. Оборудование имеет государственное свидетельство об утверждении типа средств измерений. Процесс измерений контролируется. Возникающий в ряде случаев «тепловой шум» (как, например, при регистрации тепловых потоков в точке 1 на рис. 2) можно сгладить путем правильного выбора периода усреднения экспериментальных данных.

Korniyenko, S.; Tkachev, M.; Tkachev, S.

Impact of vegetation layer on external heat transfer characteristics;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11501. doi: 10.4123/CUBS.115.1

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Analysis of thermal conditions of research object

Основными результатами эксперимента являются фактические (измеренные) значения температуры и плотности теплового потока в различных точках исследуемого объекта.

Анализ полученных результатов измерений позволяет установить следующие закономерности (рис. 2–4).

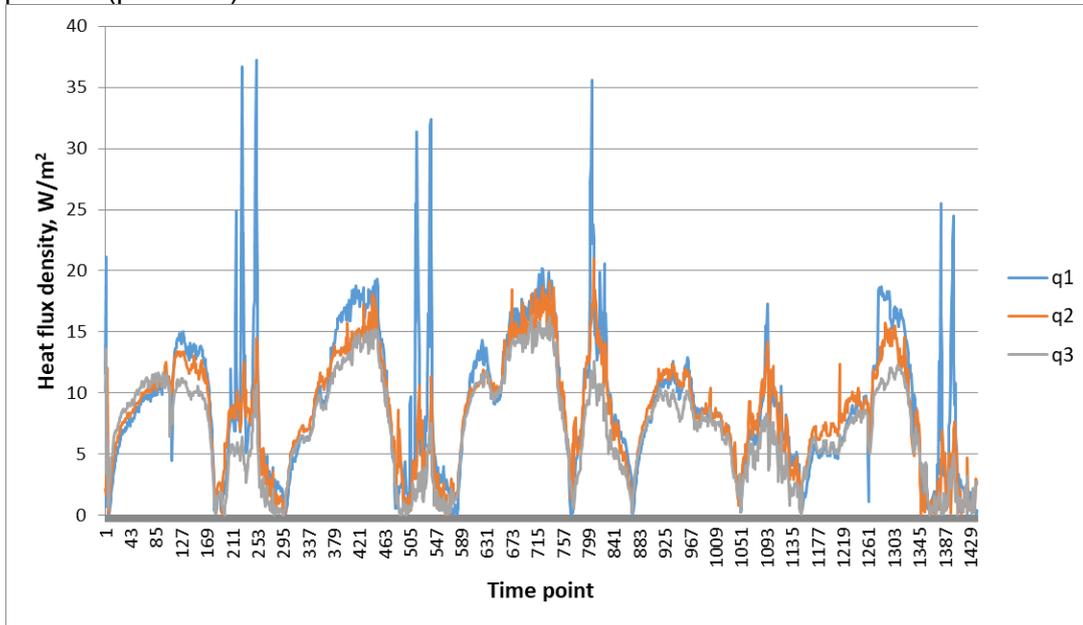


Fig. 2 – Heat flux density fluctuations at points 1–3

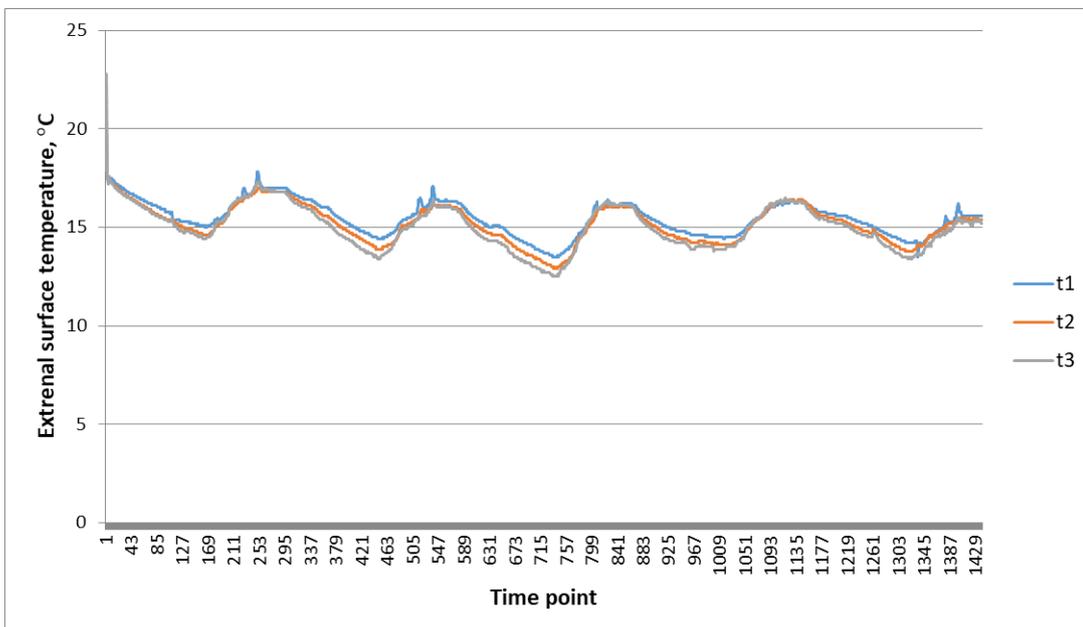
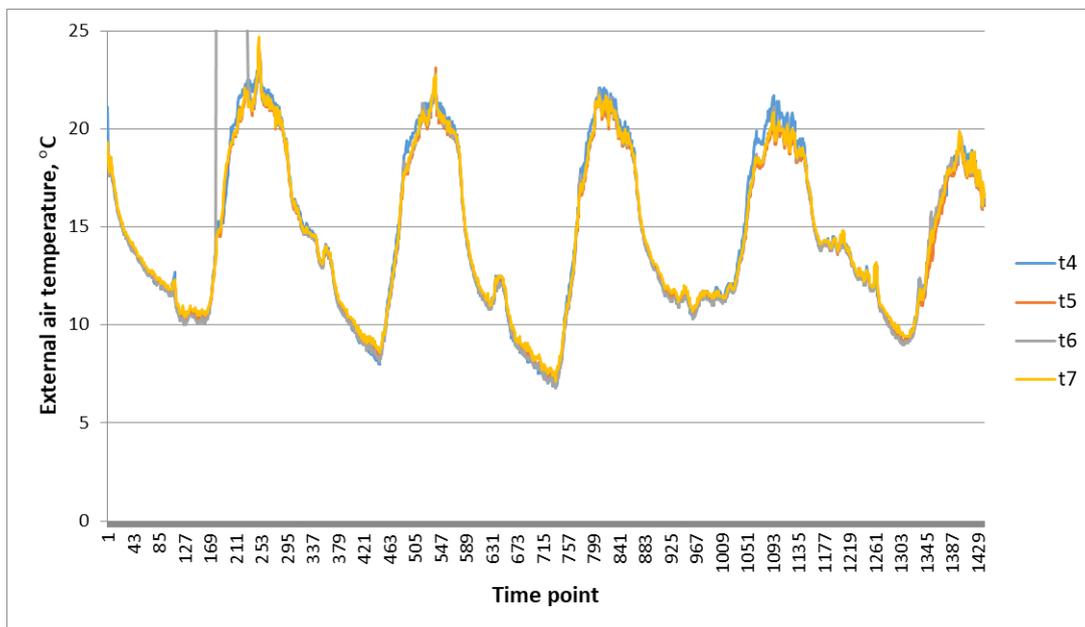


Fig. 3 – External surface temperature fluctuations at points 1–3



**Fig. 4 – External air temperature fluctuations at points (4 – sensor is not protected from direct solar radiation, 5-7 – sensors protected from direct solar radiation)**

Из рис. 2–4 видно, что колебания теплового потока и температур носят сложный характер, обусловленный суточными циклами. Максимальным значениям температур соответствуют минимальные значения тепловых потоков и наоборот. Амплитуда колебаний температуры на поверхности грунта заметно меньше амплитуды колебаний температуры наружного воздуха, что указывает на затухающий характер температурных колебаний по мере продвижения в грунт. Коэффициент затухания температурных колебаний  $\nu = 2.5\text{--}3.0$ , следовательно, поверхностный слой субстрата и растительный слой находятся в зоне активных колебаний. Температуры воздуха в различных точках измерений почти совпадают, что исключает влияние прочих факторов (прямой солнечной радиации, стенок ящика) на температурный режим исследуемого фрагмента (рис. 4). При сравнении рис. 3 и 4 можно заключить, что растительный слой заметно сглаживает температурную волну, образуемую вследствие колебаний температуры воздуха.

Выявленные закономерности позволяют определить характеристики теплообмена озелененной поверхности.

### 3.2 External heat transfer characteristics for green surface

Основными характеристиками теплообмена внешних поверхностей с окружающей средой являются коэффициент теплообмена и сопротивление теплообмену поверхностей.

Используя данные измерений, можно определить коэффициент теплообмена поверхности по формуле

$$h_{se} = \frac{1}{N} \sum_i h_i, \quad (1)$$

где  $N$  – количество точек, в которых проводятся измерения;  $h_i$  – коэффициент теплообмена в  $i$ -й точке поверхности, определяемый по формуле

$$h_i = \frac{q_i}{t_i^{se} - t_i^a}, \quad (2)$$

где  $q_i$  – среднее значение плотности теплового потока в  $i$ -й точке поверхности;  $t_i^{se}$  – среднее значение температуры в  $i$ -й точке поверхности;  $t_i^a$  – среднее значение температуры окружающего воздуха в  $i$ -й точке поверхности.

Результаты расчета коэффициента теплообмена озелененной поверхности по формулам (1)–(2) приведены в табл. 2.

**Table 2. External heat transfer coefficient (from surface to air) for green surface**

№ точки	$q_i$ , Вт/м <sup>2</sup>	$t_i^{si}$ , °С	$t_i^a$ , °С	$h_i$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1	9.10	15.47	14.62	10.8

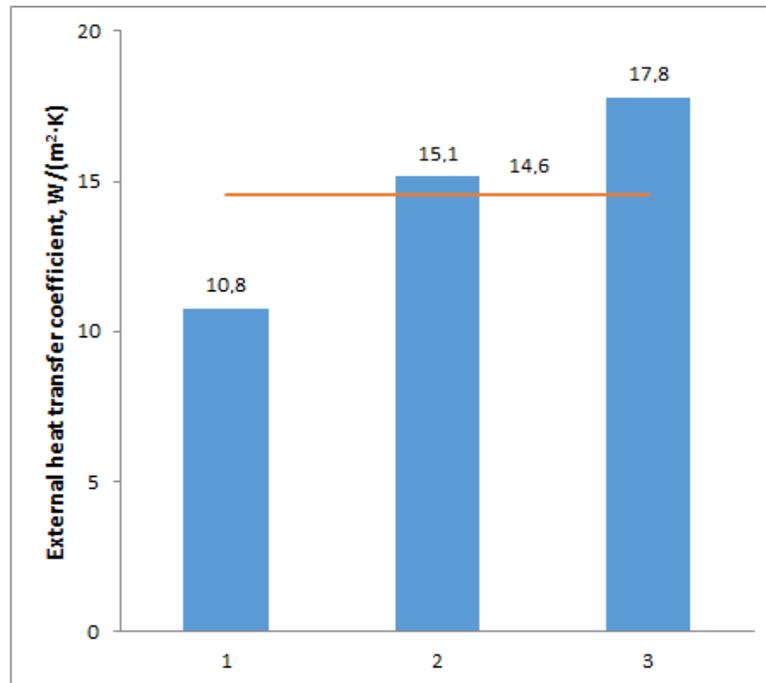
Korniyenko, S.; Tkachev, M.; Tkachev, S.

Impact of vegetation layer on external heat transfer characteristics;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11501. doi: 10.4123/CUBS.115.1

2	8.46	15.18	14.62	15.1
3	7.08	15.02	14.62	17.8
Среднее значение				14.6

На рис. 5 приведены результаты измерений коэффициента теплообмена озелененной поверхности на основе визуализации данных табл. 2.



**Fig. 5 – External heat transfer coefficients (from surface to air) at the green surface points (bar chart) and average value (line)**

Среднее значение коэффициента теплообмена озелененной поверхности  $h_{se} = 14.6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). На основании этого значения вычислено сопротивление теплообмену озелененной поверхности  $R_{se} = 0.068$  м<sup>2</sup>·К/Вт.

Сравнивая полученное значение  $R_{se}$  со стандартным значением 0.04 м<sup>2</sup>·К/Вт согласно ISO/FDIS 13788:2012(E), можно отметить, что сопротивление теплообмену озелененной поверхности превышает стандартное значение в 1.7 раза. Это можно объяснить тем, что растительность создает дополнительное сопротивление конвективному переносу теплоты по сравнению с поверхностями без озеленения.

Полученные результаты дают возможность более точно выполнить расчет теплообмена озеленяемых крыш.

## 4 Conclusions

По итогам натурных теплотехнических испытаний получены достоверные данные, устанавливающие закономерную связь между озеленением и фактическими характеристиками теплообмена (коэффициентом теплообмена, сопротивлением теплообмену) озелененной поверхности.

Основные выводы по результатам исследования:

1. Согласно экспериментальным наблюдениям установлено, что колебания теплового потока и температуры на поверхности с растительным слоем носят сложный характер, обусловленный суточными циклами. При этом максимальным значениям температур соответствуют минимальные значения тепловых потоков и наоборот.

2. Доказано, что растительный слой заметно сглаживает температурную волну, образуемую вследствие колебаний температуры наружного воздуха. Амплитуда колебаний температуры на озелененной поверхности меньше амплитуды колебаний температуры наружного воздуха, что указывает на затухающий характер температурных колебаний по мере продвижения в субстрат.



Коэффициент затухания температурных колебаний  $\nu = 2.5\text{--}3.0$ , следовательно, поверхностный слой субстрата и растительный слой находятся в зоне активных колебаний.

3. Показано, что температуры воздуха в различных точках измерений почти совпадают, что исключает влияние прочих факторов на температурный режим исследуемого фрагмента.

4. Впервые установлено численное значение коэффициента теплообмена озелененной поверхности  $h_{se} = 14.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , на основании которого вычислено сопротивление теплообмену  $R_{se} = 0.068 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Сопротивление теплообмену озелененной поверхности превышает стандартное значение в 1.7 раза. Это можно объяснить тем, что растительность создает дополнительное сопротивление конвективному переносу теплоты по сравнению с поверхностями без озеленения.

5. Полученные результаты дают возможность более точно выполнить расчет теплообмена озеленяемых крыш. Результаты данного исследования будут полезны архитекторам и инженерам для поиска устойчивых экосистемных конструктивных решений в умеренно-континентальном климате.

## 5 Acknowledgements

Работа выполнена в рамках подготовки научно-исследовательских работ по теме № 2.3.1.1. «Направления развития энергоэффективного градостроительства России (энергоэффективные кварталы как инновационные планировочные образования)» ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России».

## References

- 1 Salata, F., Golasi, I., Volaro, A.D.L. and Volaro, R.D.L. (2015) How High Albedo and Traditional Buildings' Materials and Vegetation Affect the Quality of Urban Microclimate. A Case Study. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., **99**, 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.010>.
- 2 Barozzi, B. and Pollastro, M.C. (2016) Assessment of the Impact of Cool Roofs in Temperate Climates through a Comparative Experimental Campaign in Outdoor Test Cells. *Buildings*, **6**. <https://doi.org/10.3390/buildings6040052>.
- 3 Akbari, H. and Rose, L.S. (2008) Urban Surfaces and Heat Island Mitigation Potentials. *Journal of the Human-Environment System*, **11**, 85–101. <https://doi.org/10.1618/jhes.11.85>.
- 4 Ouldoukhitine, S.E., Bakkour, A., Amziane, S. and Belarbi, R. (2024) A Comparative Study of Energy Performance of Green, White, and Gravel Roofs in a Temperate Climate through In-Situ Measurement and Dynamic Simulation. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., **320**, 114630. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114630>.
- 5 Gorshkov, A., Pestryakov, I.I., Korniyenko, S.V., Vatin, N.I. and Olshevskiy, V. (2018) Actual Thermal Insulation Properties of Cellular Autoclave Curing Concretes. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **5**, 75–104. <https://doi.org/10.18720/CUBS.68.7>.
- 6 Gorshkov, A.S. and Korniyenko, S.V. (2019) The Technical and Economic Basis of Facade Systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **1**, 30–40. <https://doi.org/10.18720/CUBS.76>.
- 7 Korniyenko, S.; Brekhov, E.; Tkachev, M.; Tkachev, S. (2024) Impact of Slab Edge Zones on Slab-on-Grade Heat Losses. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.6>.
- 8 Vatin, N. I., Petrichenko, M. R., Korniyenko, S. V., Gorshkov, A. S., Nemova, D. V. (2016) Air mode of a tripple wall. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **6**, 102–114. <https://unistroy.spbstu.ru/article/2016.45.6/>
- 9 Lee, J., Kim, J., Song, D., Kim, J. and Jang, C. (2017) Impact of External Insulation and Internal Thermal Density upon Energy Consumption of Buildings in a Temperate Climate with Four Distinct Seasons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **75**, 1081–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.087>.
- 10 Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G. and Xu, T. (2020) Optimum Insulation Thicknesses and Energy Conservation of Building Thermal Insulation Materials in Chinese Zone of Humid Subtropical Climate. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, **52**, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101840>.
- 11 Vatin, N. and Korniyenko, S. V. (2022) Energy Performance of Buildings Made of Textile-Reinforced Concrete (TRC) Sandwich Panels. *Magazine of Civil Engineering*, **113**. <https://doi.org/10.34910/MCE.113.3>.



- 12 Kostenko, V.A., Gafiyatullina, N.M., Semchuk, A.A. and Kukolev, M.I. (2016) Geothermal Heat Pump in the Passive House Concept. *Magazine of Civil Engineering*, **68**, 18–25. <https://doi.org/10.5862/MCE.68.2>.
- 13 Statsenko, E.A., Ostrovaia, A.F., Musorina, T.A., Kukolev, M.I. and Petritchenko, M.R. (2016) The Elementary Mathematical Model of Sustainable Enclosing Structure. *Magazine of Civil Engineering*, **68**, 86–91. <https://doi.org/10.5862/MCE.68.9>.
- 14 Sergeev, V. V., Petrichenko, M.R., Nemova, D. V., Kotov, E. V., Tarasova, D.S., Nefedova, A. V. and Borodinecs, A.B. (2018) The Building Extension with Energy Efficiency Light-Weight Building Walls. *Magazine of Civil Engineering*, **84**, 67–74. <https://doi.org/10.18720/MCE.84.7>.
- 15 Rodrigues, E., Fernandes, M.S., Gaspar, A.R., Gomes, Á. and Costa, J.J. (2019) Thermal Transmittance Effect on Energy Consumption of Mediterranean Buildings with Different Thermal Mass. *Applied Energy*, Elsevier, **252**, 113437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113437>.
- 16 Sovetnikov, D., Baranova, D., Borodinecs, A. and Korniyenko, S. (2018) Technical Problems in Churches in Different Climatic Conditions. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **64**, 20–35. <https://doi.org/10.18720/CUBS.64.2>.
- 17 Korniyenko, S., Dubov, I. and Nazarov, K. (2023) Field Study of Thermal Comfort in Dwelling during the Winter, Mid-Season and Summer. *Magazine of Civil Engineering*, **121**. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.1>.
- 18 Fang, H., Zhao, D., Yuan, J., Aili, A., Yin, X., Yang, R. and Tan, G. (2019) Performance Evaluation of a Metamaterial-Based New Cool Roof Using Improved Roof Thermal Transfer Value Model. *Applied Energy*, Elsevier, **248**, 589–599. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.116>.
- 19 Chen, J. and Lu, L. (2021) Comprehensive Evaluation of Thermal and Energy Performance of Radiative Roof Cooling in Buildings. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **33**, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101631>.
- 20 Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S. and Vlissidis, A. (2012) Numerical and Experimental Analysis of Cool Roofs Application on a Laboratory Building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., **55**, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.011>.
- 21 Stavrakakis, G.M., Androutsopoulos, A. V. and Vyörykkä, J. (2016) Experimental and Numerical Assessment of Cool-Roof Impact on Thermal and Energy Performance of a School Building in Greece. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., **130**, 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.047>.
- 22 He, Y., Yu, H., Ozaki, A. and Dong, N. (2020) Thermal and Energy Performance of Green Roof and Cool Roof: A Comparison Study in Shanghai Area. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **267**, 122205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122205>.
- 23 Testa, J. and Krarti, M. (2017) A Review of Benefits and Limitations of Static and Switchable Cool Roof Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **77**, 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.030>.
- 24 Korniyenko, S. V. (2022) The Influence of the Sky Radiative Temperature on the Building Energy Performance. *Magazine of Civil Engineering*, **114**. <https://doi.org/10.34910/MCE.114.12>.
- 25 Shafique, M., Xue, X. and Luo, X. (2020) An Overview of Carbon Sequestration of Green Roofs in Urban Areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, Elsevier, **47**, 126515. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>.
- 26 Rosasco, P. and Perini, K. (2019) Selection of (Green) Roof Systems: A Sustainability-Based Multi-Criteria Analysis. *Buildings*, **9**. <https://doi.org/10.3390/buildings9050134>.
- 27 Teotónio, I., Cabral, M., Cruz, C.O. and Silva, C.M. (2020) Decision Support System for Green Roofs Investments in Residential Buildings. *Journal of Cleaner Production*, **249**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119365>.
- 28 Wang, R., Chao, R., Yong, X., Kevin, L. (2018) Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban Climate*, **24**, 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>.
- 29 Yang, J., Yu, Q. and Gong, P. (2008) Quantifying Air Pollution Removal by Green Roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, **42**, 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>.
- 30 Li, J.F., Wai, O.W.H., Li, Y.S., Zhan, J.M., Ho, Y.A., Li, J. and Lam, E. (2010) Effect of Green Roof on Ambient CO<sub>2</sub> Concentration. *Building and Environment*, **45**, 2644–2651. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.025>.
- 31 Gourджи, S. (2018) Review of Plants to Mitigate Particulate Matter, Ozone as Well as Nitrogen

Korniyenko, S.; Tkachev, M.; Tkachev, S.

Impact of vegetation layer on external heat transfer characteristics;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11501. doi: 10.4123/CUBS.115.1



- Dioxide Air Pollutants and Applicable Recommendations for Green Roofs in Montreal, Quebec. *Environmental Pollution*, Elsevier Ltd, **241**, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.053>.
- 32 Shafique, M., Kim, R. and Rafiq, M. (2018) Green Roof Benefits, Opportunities and Challenges – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**, 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.
- 33 Arghavani, S., Malakooti, H. and Ali Akbari Bidokhti, A.A. (2020) Numerical Assessment of the Urban Green Space Scenarios on Urban Heat Island and Thermal Comfort Level in Tehran Metropolis. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **261**, 121183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121183>.
- 34 Zhao, C., Jensen, J., Weng, Q., Currit, N., Weaver, R. (2020) Use of Local Climate Zones to Investigate Surface Urban Heat Islands in Texas. *GIScience & Remote Sensing*, **8**, 1083–1101. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1843869>.
- 35 Korniyenko, S., Dikareva, E. (2022) The Sky Visibility at Shading by Trees. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **102**, 10203. <https://doi.org/10.4123/CUBS.102.3>.
- 36 Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B. and Pressnail, K. (2006) Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. *Environmental Science and Technology*, **40**, 4312–4316. <https://doi.org/10.1021/es0517522>.
- 37 Van Renterghem, T. and Botteldooren, D. (2009) Reducing the Acoustical Façade Load from Road Traffic with Green Roofs. *Building and Environment*, Elsevier Ltd, **44**, 1081–1087. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.013>.
- 38 Chowdhury, S., Hamada, Y. and Shabbir Ahmed, K. (2017) Indoor Heat Stress and Cooling Energy Comparison between Green Roof (GR) and Non-Green Roof (n-GR) by Simulations for Labor Intensive Factories in the Tropics. *International Journal of Sustainable Built Environment*, The Gulf Organisation for Research and Development, **6**, 449–462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.09.001>.
- 39 La Roche, P. and Berardi, U. (2014) Comfort and Energy Savings with Active Green Roofs. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., **82**, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055>.
- 40 Borodinecs, A., Zemitis, J., Geikins, A., Bykova, I. V., Nefedova, A. V and Kupavykh, S. V. (2018) Energy-Efficient Construction in the Climatic Conditions of Latvia TT - Энергоэффективное Строительство в Климатических Условиях Латвии. *Stroitel'stvo Unikal'nyh Zdanij i Sooruzenij*, **3**, 41–48. <https://doi.org/10.18720/CUBS.66.4>.
- 41 Wang, H., Qin, J. and Hu, Y. (2017) Are Green Roofs a Source or Sink of Runoff Pollutants? *Ecological Engineering*, Elsevier B.V., **107**, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.035>.
- 42 Schultz, I., Sailor, D.J. and Starry, O. (2018) Effects of Substrate Depth and Precipitation Characteristics on Stormwater Retention by Two Green Roofs in Portland OR. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, **18**, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.06.008>.
- 43 Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.E. and Belarbi, R. (2012) A Comprehensive Study of the Impact of Green Roofs on Building Energy Performance. *Renewable Energy*, **43**, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>.
- 44 Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F. (2006) World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- 45 Ouldboukhitine, S.E., Belarbi, R. and Djedjig, R. (2012) Characterization of Green Roof Components: Measurements of Thermal and Hydrological Properties. *Building and Environment*, **56**, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>.
- 46 Ouldboukhitine, S.E., Belarbi, R. and Sailor, D.J. (2014) Experimental and Numerical Investigation of Urban Street Canyons to Evaluate the Impact of Green Roof inside and Outside Buildings. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, **114**, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.073>.