

УДК 699.8

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

EDN: GMFZPL

# ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИОННОГО НАГРЕВА КРОВЛИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ПОКРЫТИЯ

В.М. ТУСНИНА<sup>1,✉</sup>, канд. техн. наук  
А.А. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук  
Д.А. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», проспект Мира, д. 131, г. Москва, 129226, Российская Федерация

## Аннотация

**Введение.** В статье освещаются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности совмещенных покрытий в части накопления в их конструкциях конденсационной влаги, вызывающей протечки в помещениях верхних этажей зданий. Работа актуальна тем, что такие проблемы вскрываются при обследовании зданий во время ремонтных работ и реконструкции. Течи в потолках помещений бесчердачных зданий обнаруживались в сухую солнечную погоду в условиях значительного нагрева кровли за счет солнечной радиации.

**Цель:** оценка влияния инсоляционного нагрева кровли на образование конденсата в совмещенном покрытии здания в летнее время года с учетом его конструктивного решения.

**Материалы и методы.** Приведены материалы по обследованию зданий в Московском регионе на предмет их ремонта и реконструкции, выявившие проблему образования протечек в совмещенных покрытиях зданий в сухие солнечные дни летнего времени года. Методом аналитического расчета исследован процесс влагопереноса через ограждающую конструкцию покрытия на примере конструктивного решения кровли обследованного объекта.

**Результаты.** В результате расчета влагопереноса определены сопротивления паропрооницанию, действительные и максимальные парциальные давления водяного пара и температуры на границах слоев исследуемых конструкций. Графическим методом выявлено изменение этих параметров в толще конструкций, показавшее, в каких местах образуется точка росы, свидетельствующая о возможном выпадении конденсата в ограждении. Для сравнительного анализа произведен расчет влагопереноса в аналогичной конструкции с заменой минераловатного утеплителя на экструдированный пенополистирол.

**Выводы.** 1. Результаты расчета влагопереноса в исследуемых конструкциях покрытий подтвердили факт возможности образования конденсата от инсоляционного нагрева кровли в летний период года. 2. Выбор конструктивного решения кровли при проектировании зданий должен осуществляться на основе точных тепловлажностных расчетов с учетом климатических особенностей района строительства, в том числе для летнего времени года.

**Ключевые слова:** нагрев, инсоляция, кровля, конденсат, паропроницаемость, каменная вата

**Для цитирования:** Туснина В.М., Емельянов А.А., Емельянов Д.А. Влияние инсоляционного нагрева кровли на эксплуатационную надежность покрытия. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):61–69. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

#### **Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.12.2023

Поступила после рецензирования 22.12.2023

Принята к публикации 18.01.2024

## **EFFECT OF INSOLATION HEATING OF ROOF COVERINGS ON THEIR PERFORMANCE RELIABILITY**

V.M. TUSNINA<sup>1,✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

A.A. EMELYANOV<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

D.A. EMELYANOV<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC "Scientific and technical center of engineering", prospekt Mira, 131, Moscow, 129226, Russian Federation

### **Abstract**

*Introduction.* The article addresses the issues of ensuring the performance reliability of warm roofs in terms of condensation moisture accumulating in their structures, which causes leaks on the upper floors of buildings. Such problems are often revealed when buildings are inspected during repair and reconstruction works. Leaks in the ceilings of buildings with warm roofs were detected in dry, sunny weather with significant heating of the roof covering due to solar radiation.

*Aim.* To examine the effect of the insolation heating of a roof covering on the formation of condensate in the warm roof of a building in summer, taking into account its design solution.

*Materials and methods.* Materials are presented on inspection of buildings in the Moscow region for repair and reconstruction needs; they reveal the problem of leak formation in the warm roofs of buildings on dry, sunny summer days. The process of moisture transfer through the exterior covering was analyzed through analytical calculations using the roof design solution in the considered structure as an example.

*Results.* The calculation of moisture transfer yielded vapor transmission resistance, conventional true and maximum partial pressures of water vapor, as well as temperatures at the layer boundaries in the studied structures. Changes in these parameters across the thickness of structures were revealed via a graphical method, which showed where the dew point indicating possible condensation in the covering is formed. For a comparative analysis, moisture transfer was calculated for a similar design in which mineral wool insulation was replaced by extruded polystyrene.

*Conclusions.* 1. The calculations of moisture transfer in the examined covering designs confirmed the formation of condensate due to the insolation heating of the roof in summer. 2. The choice of a covering design solution in the design of buildings should be based on accurate heat and moisture calculations taking into account climatic conditions in the construction area, including for the summer season.

**Keywords:** heating, insolation, roof covering, condensate, vapor transmission, stone wool

**For citation:** Tushina V.M., Emelyanov A.A., Emelyanov D.A. Effect of insolation heating of roof coverings on their performance reliability. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):61–69. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

#### **Author contribution statements**

All the authors have contributed equally to the publication.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 14.12.2023*

*Revised 22.12.2023*

*Accepted 18.01.2024*

## **Введение**

Совмещенные покрытия зданий являются сложными многослойными конструкциями, подвергающимися комплексу силовых и несиловых воздействий, влияющих на их эксплуатационную надежность [1–3]. К одной из разновидностей несиловых нагрузок относится солнечная радиация, вызывающая нагревание кровли в летнее время года до очень высокой температуры, особенно если гидроизоляционный слой кровли не имеет защитного покрытия из материалов светлых тонов, способных в некоторой степени отражать солнечную радиацию [4]. Кровельное покрытие темных цветов способно в солнечные летние дни нагреваться до +80 °С и выше. При этом если в конструкции кровли падение температуры будет более интенсивным, нежели падение упругости водяного пара, могут создаваться условия, которые вызовут конденсацию водяного пара в толще самой конструкции [5]. Такое увлажнение наружной ограждающей конструкции, которой является кровля, зависит от ее конструктивного решения и, в частности, от типа материалов, применяемых в качестве теплоизоляционного слоя. Сегодня в конструкциях совмещенных покрытий зданий широко используется легкий утеплитель из минеральной ваты, характеризующийся низким коэффициентом теплопроводности. Однако за счет капиллярно-пористой структуры такой утеплитель подвержен увлажнению, не только ухудшающему его теплотехнические свойства, но и температурно-влажностный режим конструкции кровли в целом, снижая ее эксплуатационную надежность.

Вопросам температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий посвящена работа [6], в которой рассматриваются теоретические основы расчета кинетики изменения потенциалов и коэффициентов тепло- и влагопереноса в зависимости от изменения температуры и влажности материалов на примере модели пористого тела. Полученные автором зависимости могут использоваться для расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий из капиллярно-пористых строительных материалов.

В работе [7] анализируются закономерности процесса влагопереноса в ограждающей конструкции, моделируя ее работу в эксплуатационных условиях. Приводится методика расчета, учитывающая движение воздуха в конструкции. Установлено, что нормативные методы измерения паропроницаемости сильно упрощены и требуют научного развития.

По результатам экспериментального исследования ограждающих конструкций, приведенным в работе [8], установлено, что стандартные методы определения паропроницаемости не учитывают условия эксплуатации материалов в ограждающих конструкциях. Это может повлечь за собой ошибочность использования в расчетах коэффициентов паропроницаемости из справочных таблиц. Результаты испытаний показали, что скорость паропроницания увеличивается при ветровом воздействии, но зависит также от свойств материалов. Установлено, что гидрофильные характеристики материалов значительно влияют на их паропроницаемость.

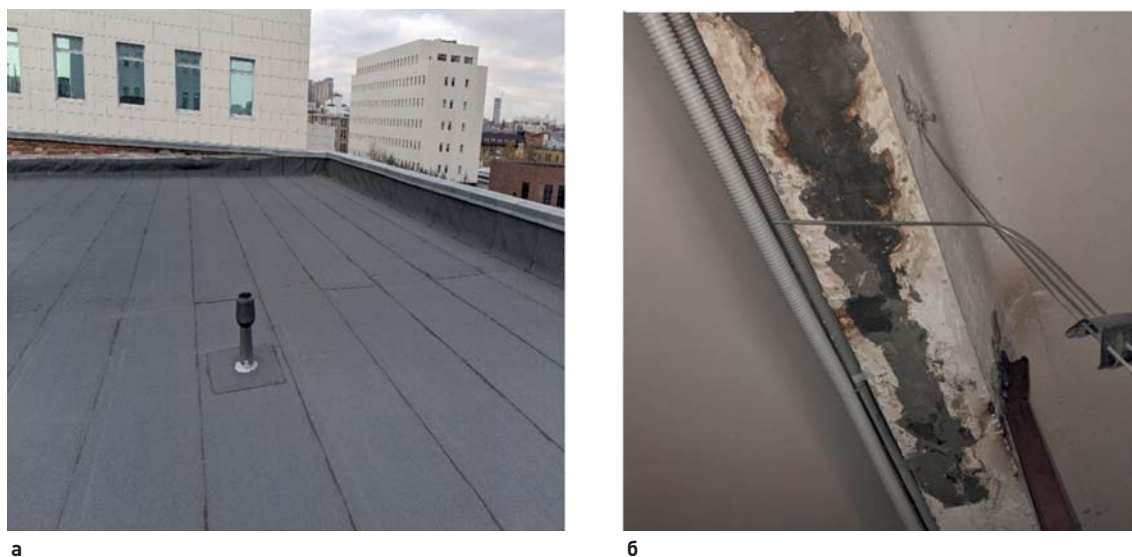
Как показали результаты экспериментальных исследований, приведенные в работе [9], паропроницаемость теплоизоляционных материалов не является постоянной величиной и меняется в зависимости от влажности, температуры и расположения материальных слоев в конструкции ограждения.

Оценка влияния изменения паропроницаемости материалов ограждающей конструкции под действием эксплуатационных нагрузок на ее температурно-влажностное состояние, результаты которой приведены в работе [10], доказывает необходимость учета переменного значения коэффициента паропроницаемости на этапе проектирования наружных ограждающих конструкций. По результатам проведенных исследований установлено, что общая паропроницаемость конструкции зависит от теплопроводности ее отдельных слоев, которая способна изменить в них эксплуатационную относительную влажность. Особо подчеркнуто существенное влияние учета переменного значения паропроницаемости на количественную оценку влажностного состояния ограждающей конструкции.

В работе [11] показана необходимость учета диффузии парообразной влаги при проектировании теплозащиты ограждающих конструкций. По результатам данного исследования установлено, что, изменяя теплопередачу и паропроницаемость отдельных слоев и их взаиморасположение в ограждающей конструкции, можно исключить накопление в них парообразной и конденсированной влаги.

С проблемой накопления конденсированной влаги в ограждающих конструкциях совмещенных покрытий в виде протечек достаточно часто встречаются при обследовании зданий на предмет их ремонта и реконструкции. Специалистами ООО «Научно-технический центр Инжиниринга» при обследовании зданий в Московском регионе с целью выявления причин образования протечек покрытий в период сухих солнечных летних дней было установлено, что в утеплителе из каменной ваты накапливалась конденсированная влага, которая протекала в помещения через швы железобетонных плит покрытия (рис. 1). При этом в кровлях с теплоизоляцией из пеноплекса, обладающего меньшим коэффициентом паропроницаемости, таких проблем не наблюдалось.

Минераловатный утеплитель сегодня широко применяется в качестве эффективной теплоизоляции в ограждающих конструкциях зданий, в том числе и в совмещенных покрытиях с рулонной кровлей. Проектирование покрытий с утеплением каменной ватой на объектах капитального строительства, как правило, выполняется по типовым техническим решениям той или иной кровельной системы. Типовые конструктивные решения совмещенных покрытий с утеплителем из каменной ваты предусматривают защитный слой от солнечной радиации в виде светоотражающих посыпок, а для проветривания утеплителя – установку на кровле аэраторов. Как показали обследования причин возникновения протечек с кровель, имеющих такие конструктивные решения, данные методы защиты не всегда эффективны.



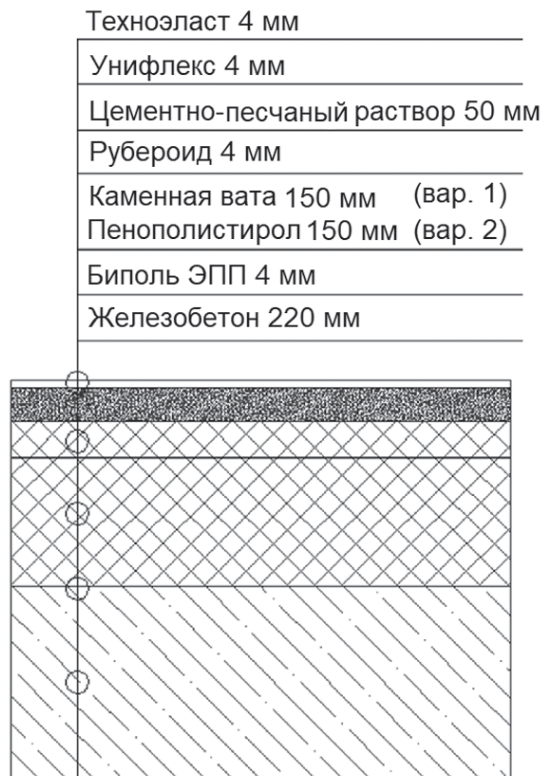
**Рис. 1.** Совмещенное покрытие обследуемого объекта: *а* – фрагмент кровли с аэратором; *б* – фрагмент вскрытого потолка в месте протечки  
**Fig. 1.** Warm roof of the examined structure: *a* – fragment of the roof covering with an aerator; *b* – fragment of the ceiling exposed in the place of leakage

**Цель работы** – исследование влияния инсоляционного нагрева кровли на образование конденсата в совмещенном покрытии здания в летнее время года.

## Материалы исследования

Исследование процесса влагопереноса через ограждающую конструкцию покрытия методом аналитического расчета производилось на примере конструктивного решения кровли обследованного объекта, в котором в качестве теплоизоляции была применена каменная вата (вар. 1). Для сравнительного анализа был произведен расчет влагопереноса в аналогичной конструкции с заменой минераловатного утеплителя на экструдированный пенополистирол (вар. 2) (рис. 2). Расчетные теплотехнические показатели материалов слоев исследуемых конструкций приведены в табл. 1.

Расчет выполнен для климатических условий г. Москвы в летний период года для дней с максимальной солнечной радиацией



**Рис. 2.** Исследуемая конструкция покрытия  
**Fig. 2.** Analyzed design of the covering

Таблица 1

Расчетные теплотехнические показатели материалов слоев конструкции

Table 1

Estimated thermal performance of layer materials in the structure

| № слоя | Материал                                                             | Расчетные характеристики материалов |                                            |                                               |
|--------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|        |                                                                      | Толщина, δ, м                       | Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м×°С) | Коэффициент паропроницаемости, μ, мг/(м×ч×Па) |
| 1      | Техноэласт                                                           | 0,004                               | 0,17                                       | 0,0014                                        |
| 2      | Унифлекс                                                             | 0,004                               | 0,17                                       | 0,0014                                        |
| 3      | Цементно-песчаный раствор                                            | 0,05                                | 0,76                                       | 0,09                                          |
| 4      | Рубероид (ГОСТ 10923-93 [12])                                        | 0,004                               | 0,17                                       | 0,0014                                        |
| 5      | Каменная вата Технорф Н30 (вариант 1)/<br>Пенополистирол (вариант 2) | 0,15                                | 0,041/0,032                                | 0,3/0,015                                     |
| 6      | Биполь ЭПП                                                           | 0,004                               | 0,17                                       | 0,0014                                        |
| 7      | Железобетон (ГОСТ 26633-2015 [13])                                   | 0,22                                | 2,04                                       | 0,03                                          |

с учетом нагрева кровельного покрытия до +80 °С. Температурно-влажностные характеристики внутреннего и наружного воздуха приняты:  $t_{в} = +18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi_{в} = 50\%$ ;  $t_{н} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi_{н} = 70\%$ .

Расчет на конденсацию влаги в исследуемых конструкциях производился графическим методом в соответствии с требованиями СП 50.13330.2012 [14], СП 131.13330.2020 [15], СП 23-101-2004 [16].

Для этого определялись: сопротивление паропроницанию  $R$ , действительные и максимальные парциальные давления водяного пара  $e_i$  и  $E_i$  соответственно и температуры  $t_i$  на границах слоев конструкции (табл. 2).

По результатам расчета построены графики изменения температуры  $t$ , действительного  $e$  и максимального  $E$  парциальных давлений в толще исследуемых конструкций (рис. 3).

Таблица 2

Результаты расчета

Table 2

Calculation results

| № слоя | Вариант № 1<br>(утеплитель – каменная вата) |                |                | Вариант № 2<br>(утеплитель – пенополистирол) |                |                |
|--------|---------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------------------|----------------|----------------|
|        | $t, ^{\circ}\text{C}$                       | $e, \text{Па}$ | $E, \text{Па}$ | $t, ^{\circ}\text{C}$                        | $e, \text{Па}$ | $E, \text{Па}$ |
| 1      | 19,65                                       | 2320,0         | 1022,0         | 19,65                                        | 2320,0         | 1022,0         |
| 2      | 21,23                                       | 2420,0         | 10453,6        | 21,23                                        | 2420,0         | 6530,3         |
| 3      | 21,38                                       | 2560,0         | 15866,4        | 21,38                                        | 2560,0         | 8868,4         |
| 4      | 27,00                                       | 3706,0         | 79571,3        | 27,00                                        | 3706,0         | 9912,5         |
| 5      | 74,17                                       | 38589,0        | 15893,8        | 74,17                                        | 38589,0        | 48996,7        |
| 6      | 78,34                                       | 45402,0        | 16183,3        | 78,34                                        | 45402,0        | 9811,4         |
| 7      | 78,92                                       | 46340,0        | 231093,4       | 78,92                                        | 46340,0        | 133249,1       |

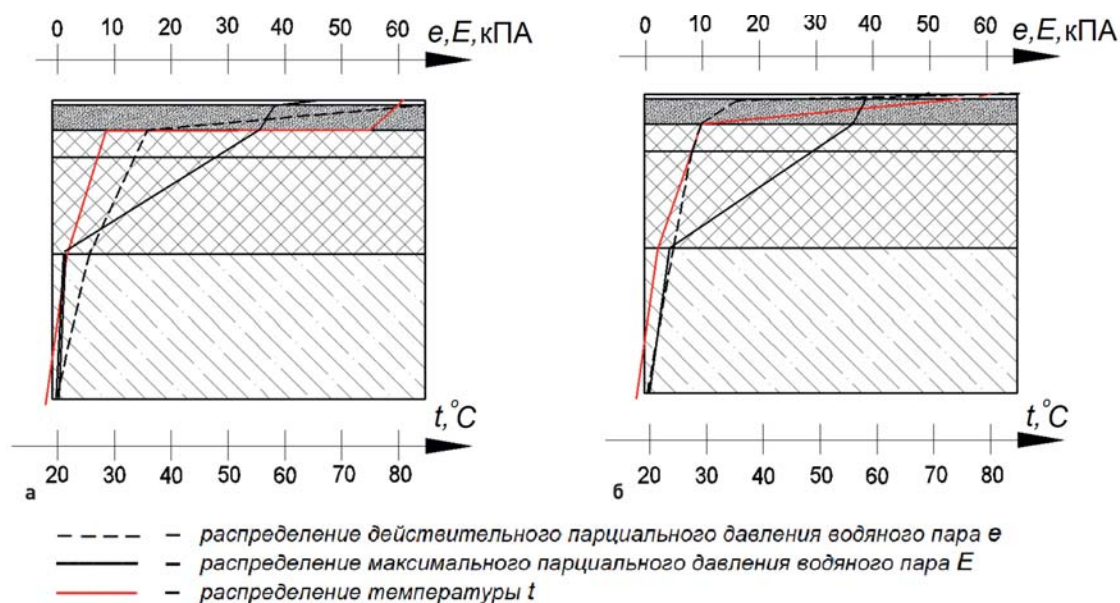


Рис. 3. Графики изменения температуры и парциальных давлений в толще исследуемых конструкций с утеплителем из каменной ваты (а) и пенополистирола (б)

Fig. 3. Graphs showing changes in temperature and partial pressures across the thickness of examined structures having stone wool (a) and extruded polystyrene insulation (b)

На рис. 3 видно, что кривые действительного и максимального парциальных давлений пересекаются, что свидетельствует о том, что в обоих вариантах конструкций в местах пересечения этих кривых образуется точка росы, определяющая возможность выпадения конденсата. При этом следует отметить, что в конструкции с теплоизоляцией из минеральной ваты выпадение конденсата осуществляется в толще утеплителя, а с утеплителем из пенополистирола – на границе с пароизоляцией. Объясняется это тем, что пенополистирол обладает гораздо меньшим коэффициентом паропроницаемости, чем минераловатные плиты (табл. 1), и не накапливает влагу в процессе эксплуатации здания, как это происходит с каменной ватой. Поэтому в кровлях, где в качестве утеплителя применяется паропроницаемый утеплитель, способный накапливать влагу в течение определенного времени, образуются протечки в покрытии.

## Выводы

1. Результаты расчета влагопереноса в исследуемых конструкциях покрытий подтвердили факт возможности образования конденсата от инсоляционного нагрева кровли в летний период года.
2. Выбор конструктивного решения кровли при проектировании зданий должен осуществляться на основе точных тепловлажностных расчетов с учетом климатических особенностей района строительства, в том числе для летнего времени года.

## Список литературы

1. Лукинский О.А. Кровли плоских крыш – национальное бедствие. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2013;(5):12–14.
2. Зернов А.Е. Надежность плоской кровли. Строительные материалы. 2006;(5):13–14.
3. Лукинский О.А. Плоские кровли: достоинства и недостатки. Строительные материалы. 2006;(5):6–10.
4. Филонов В.В. Разумный выбор материалов поможет избежать протечек кровли. Строительство: новые технологии, новое оборудование. 2014;(5):38–40.
5. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Москва: АБОК-ПРЕСС; 2006.
6. Перехоженцев А.Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолГАСУ; 2008.
7. Куприянов В.Н., Петров А.С. Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным. Известия КГАСУ. 2013;(2):126–131.
8. Куприянов В.Н. Влияние различной скорости движения воздуха на паропроницаемость теплоизоляционных материалов. Строительные материалы. 2013;(6):20–21.
9. Куприянов В.Н., Петров А.С. Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость. Известия КГАСУ. 2015;(1):92–97.
10. Петров А.С., Куприянов В.Н. Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций. Academia. Архитектура и строительство. 2016;(2):97–105.
11. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Проектирование ограждающих конструкций с учетом диффузии и конденсации парообразной влаги. Известия КГАСУ. 2011;(1):93–103.
12. ГОСТ 10923-93. Рубероид. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1994.
13. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019.
14. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Москва: Минрегион России; 2012.
15. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Москва: Стандартинформ; 2019.
16. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Москва; 2004.

## References

1. Lukinsky O.A. Roofs of flat roofs – a national disaster. Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve, 2013;(5):12–14. (In Russian).
2. Zernov A.E. Reliability of a flat roof. Stroitel'nyye materialy = Construction Materials. 2006;(5):13–14. (In Russian).
3. Lukinsky O.A. Flat roofs: advantages and disadvantages. Stroitel'nyye materialy= Construction Materials. 2006;(5):6–10. (In Russian).
4. Filonov V.V. A reasonable choice of materials will help avoid roof leaks. Stroitel'stvo: novyye tekhnologii, novoye oborudovaniye. 2014;(5):38–40. (In Russian).
5. Fokin K.F. Construction heating engineering of building envelopes. Moscow: ABOK-PRESS Publ.; 2006. (In Russian).
6. Perekhzhentsev A.G. Theoretical foundations and methods for calculating the temperature and humidity conditions of building envelopes. Volgograd: VolGASU Publ.; 2008. (In Russian).
7. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. Vapor permeability of materials in conditions close to operational. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2013;(2):126–131. (In Russian).
8. Kupriyanov V.N. The influence of different air speeds on the vapor permeability of heat-insulating materials. Stroitel'nyye materialy = Construction Materials. 2006;(6):20–21. (In Russian).
9. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. The influence of temperature and humidity operating conditions of building materials on their vapor permeability. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2015;(1):92–97. (In Russian).
10. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Variable value of vapor permeability of materials under operating conditions and its influence on predicting the humidity state of enclosing structures. Academia. Architecture and Construction. 2016;(2):97–105. (In Russian).

11. Kupriyanov V.N., Safin I.Sh. Design of enclosing structures taking into account the diffusion and condensation of vaporous moisture. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2011;(1):93–103. (In Russian).
12. State Standard 10923-93. Ruberoid. Specifications. Moscow: Standards Publishing House; 1994. (In Russian).
13. State Standard 26633-2015. Normal-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
14. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. (In Russian).
15. SP 131.13330.2020. Building climatology. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
16. SP 23-101-2004. Thermal performance desing of buildings. Moscow; 2004. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Валентина Матвеевна Туснина**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: valmalaz@mail.ru  
тел.: +7 (916) 510-72-24

**Valentina M. Tusnina**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow  
e-mail: valmalaz@mail.ru  
tel.: +7 (916) 510-72-24

**Алексей Андреевич Емельянов**, канд. техн. наук, директор проектно-изыскательской компании ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», Москва  
e-mail: stcofengineering@mail.ru  
тел.: +7 (903) 294-13-78

**Alexey A. Emelyanov**, Cand. Sci. (Engineering), Director of the Design and Survey Company LLC “Scientific and technical center of engineering”, Moscow  
e-mail: stcofengineering@mail.ru  
tel.: +7 (903) 294-13-78

**Денис Андреевич Емельянов**, канд. техн. наук, главный инженер проектно-изыскательской компании ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», Москва  
e-mail: stcofengineering@mail.ru  
тел.: +7 (977) 343-27-48

**Denis A. Emelyanov**, Cand. Sci. (Engineering), Chief Engineer of the Design and Survey Company LLC “Scientific and technical center of engineering”, Moscow  
e-mail: stcofengineering@mail.ru  
tel.: +7 (977) 343-27-48

<sup>✉</sup>Автор, ответственный за переписку / Corresponding author