

РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

УДК 699.82

Научная статья

Сергей Валерьевич Корниенко✉

д-р техн. наук, советник РААСН, зав. кафедрой архитектуры зданий и сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ).
Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: skorn73@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5156-7352

Ростислав Александрович Горшков

студент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А;
e-mail: rostalsgor@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0489-4107

КОНДЕНСАЦИОННОЕ УВЛАЖНЕНИЕ КАМЕННЫХ СТЕН ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ВЛАЖНОГО КЛИМАТА

Необходимость сохранения культурного наследия для будущих поколений делает актуальной задачу прогноза влажностного режима каменных стен памятников архитектуры. Уточнены среднемесячные значения климатических параметров, необходимые для расчета. Несмотря на отсутствие конденсации влаги при заданных граничных условиях, выявлен рост сорбционной влажности материалов. Определена граница слоя резких колебаний температуры и теплового потока. Повышение влажности материалов, расположенных в слое резких колебаний, опасно. Расчетом установлено, что плоскость максимального увлажнения находится в слое резких колебаний. Это означает, что стык кирпичной кладки и наружного штукатурного слоя подвержен теплотехническому риску. Дальнейшие исследования связаны с необходимостью уточнения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций памятников архитектуры на основе динамического моделирования сложных процессов тепло-массопереноса при комплексных климатических воздействиях, в том числе с учетом увлажнения косыми дождями.

Ключевые слова: архитектура, объект культурного наследия, памятник архитектуры, ограждающая конструкция, конденсация влаги, влагонакопление, климат.

Для цитирования: Корниенко С. В., Горшков Р. А. Конденсационное увлажнение каменных стен памятников архитектуры в условиях влажного климата // Социология города. 2023. № 2. С. 44—58. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_44

Введение

Еще в 1972 г. на XVII сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО, в Конвенции о сохранении всемирного культурного наследия, отмечено, что «повреждение или исчезновение любых образцов культурной ценности представляет собой пагубное обеднение достояния всех народов мира».

Потенциал культурного наследия России огромен. На территории России расположено 207 975 объектов культурного наследия. Более половины (57 %) этих объектов представляют собой памятники архитектуры. Памятники археологии составляют 21 %, истории — 19 %, искусства — 3 % (рис. 1).

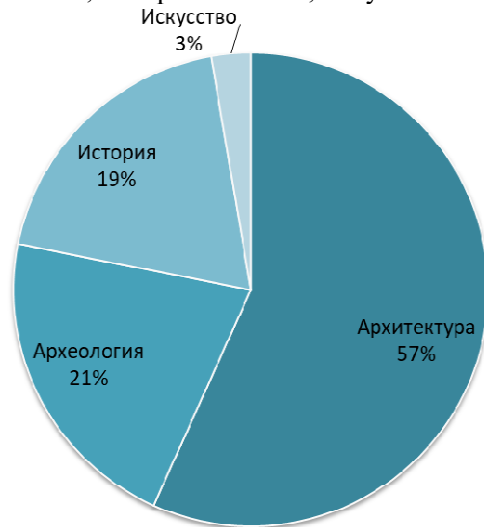


Рис. 1. Культурное наследие России. URL: https://ru.wikivoyage.org/wiki/Культурное_наследие_России/Статистика

Современное состояние объектов культурного наследия может рассматриваться как критическое. Происходит устойчивое сокращение культурного богатства нашей страны. По различным оценкам, состояние от 50 до 70 % находящихся на государственной охране памятников истории и культуры характеризуется как неудовлетворительное, для большей их части необходимо принятие срочных мер по спасению от разрушения, повреждения и уничтожения в результате проявления различных негативных явлений и процессов, включая экологические.

Влага является одной из главных причин разрушения ограждающих конструкций (Martinez-Molina et al, 2022; Sovetnikov et al, 2018; Andreotti et al, 2022; Korniyenko, 2016). Известно, что морозостойкость строительных материалов связана со степенью их увлажнения: чем больше влажность материала, тем меньше его морозостойкость (Зимин и др., 2022). Обычный керамический кирпич, являющийся долговечным материалом в стеновых конструкциях, имеющих нормальную влажность, быстро разрушается в наружных стенах с повышенной влажностью, подверженных попеременному замораживанию и оттаиванию. Отслаивание наружных штукатурок и облицовок стен также происходит из-за неблагоприятного температурно-влажностного режима, при котором влага, накопившаяся под штукатуркой или облицовкой,

замерзая, расширяется в объеме и отрывает штукатурку или облицовку. Среди способов защиты ограждающих конструкций памятников архитектуры весьма важную роль играют теплофизические методы контроля (Biseniece et al, 2017; Ascione et al, 2017; Ананьев и др., 2021; Кочев, Соколов, 2021).

Известны следующие виды влаги в стеновых ограждающих конструкциях: строительная, грунтовая, атмосферная, эксплуатационная, сорбционная и конденсационная. Процесс конденсации влаги из воздуха тесно связан с теплотехническим режимом конструкции. Влага из воздуха может конденсироваться непосредственно на внутренней поверхности ограждающей конструкции и в ее толще. Многие специалисты отмечают, что в подавляющем большинстве случаев конденсация влаги является главной причиной повышения влажности материалов ограждающих конструкций.

Интересным примером является реставрация храма Спаса на Нередице в Новгородской области (рис. 2, 3), выполненная в 1911 г. архитектором П. П. Покрышкиным (цит. по: Фокин, 2006).



Рис. 2. Церковь Спаса на Нередице. Современное состояние. Фото: wikipedia.org

Стены храма, построенного в 1198 г., были сложены из волховского известняка и имели снаружи обмазку известью. При реставрации храма наружная поверхность стен была оштукатурена толстым слоем цементного раствора для защиты кладки от атмосферных воздействий. Примерно через 2 года стены стали сыреть, и начали портиться уникальные фрески XII в. Для снижения влажности стен цементную штукатурку пришлось срубить, причем была повреждена наружная часть кладки. Влажностный режим резко ухудшился, после того как на наружную поверхность стен был нанесен толстый слой малопаропроницаемой цементной штукатурки.



Рис. 3. Интерьер церкви Спаса на Нередице. Современное состояние. Фото: wikipedia.org

Согласно статистическим данным наибольшее количество памятников архитектуры — зданий, строений, сооружений — сосредоточено в Санкт-Петербурге (8775 памятников). Климат Санкт-Петербурга умеренный и влажный, переходный от континентального к морскому (Gorshkov et al, 2020; Горшков и др., 2020). Такой тип климата объясняется географическим положением и атмосферной циркуляцией, характерной для Ленинградской области. Количество теплоты, поступающей на земную поверхность от солнечного излучения, сравнительно небольшое, поэтому влага испаряется медленно. Влажность воздуха в Санкт-Петербурге всегда высокая. Среднегодовая сумма осадков составляет около 662 мм. Большая часть атмосферных осадков выпадает с апреля по октябрь, максимум их приходится на август, а минимум — на март.

Необходимость сохранения культурного наследия для будущих поколений делает актуальной задачу прогноза влажностного режима ограждающих конструкций памятников архитектуры.

Целью исследования является оценка конденсационного увлажнения каменных стен памятников архитектуры в условиях влажного климата.

Материалы и методы

Объектом исследования является теплотехнически однородная стеновая ограждающая конструкция толщиной 640 мм, выполненная из полнотелого глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе. Внутренняя поверхность стены оштукатурена известково-песчаным раствором толщиной 15 мм. Тол-

щина наружного штукатурного слоя — 20 мм. Для оценки влияния материала наружного штукатурного слоя на влажностный режим наружной стены расчет выполнен для трех различных типов наружной штукатурки (табл. 1):

- известково-песчаная (тип 3.1);
- на основе сложного раствора (тип 3.2);
- цементно-песчаная (тип 3.3).

Выбор в качестве объекта исследования такой конструкции обусловлен ее широким применением в исторических каменных зданиях, построенных в Санкт-Петербурге до 1917 г. (URL: http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=645885).

Рассматриваются отапливаемые здания. Расчетные теплофизические характеристики материалов приведенной выше стеновой конструкции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные теплофизические характеристики материалов стеновой ограждающей конструкции (справочные данные СП 50.13330 «Тепловая защита зданий»)

№ слоя	Материал слоя	Расчетные теплофизические характеристики материалов (при условиях эксплуатации Б)		
		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоусвоение, Вт/(м ² ·К)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)
1	Внутренняя штукатурка: известково-песчаный раствор ($\rho_0=1600$ кг/м ³)	0,81	9,76	0,12
2	Каменное основание: кирпичная кладка ($\rho_0=1800$ кг/м ³)	0,81	10,12	0,11
3	Наружная штукатурка (по типам):			
3.1	известково-песчаный раствор ($\rho_0=1600$ кг/м ³)	0,81	9,76	0,12
3.2	сложный раствор ($\rho_0=1700$ кг/м ³)	0,87	10,42	0,098
3.3	цементно-песчаный раствор ($\rho_0=1800$ кг/м ³)	0,93	11,09	0,090

Теплоусвоение материала при суточном периоде колебания теплового потока определяют по формуле (1):

$$s = 0,0085\sqrt{\lambda c \rho}, \quad (1)$$

где c — расчетная удельная теплоемкость материала при заданной влажности; ρ — плотность материала в сухом состоянии (приведены в СП 50.13330).

Расчет влажностного режима наружной стены выполнен на основе теории диффузии водяного пара в сорбирующей среде. Эта теория рассматривает процессы влагопереноса только при сорбционной влажности строительных материалов. Предполагается, что перемещение влаги происходит посредством диффузии под влиянием градиента парциального давления водяного пара во влажном воздухе, заполняющем поры материала. За потенциал влажности в этой теории принимают парциальное давление пара, предполагая, что сорбированная материалом влага прочно связана с ним и в жидкой фазе неподвижна. В процессе расчета может оказаться, что в отдельных сечениях конструкции парциальное давление водяного пара достигает давления насыщенного водяного пара, соответствующего температуре в этих сечениях. Это определяет начало конденсации влаги в конструкции. Расчетом можно определить количество выпадающего конденсата в предположении, что жидкая фаза влаги остается неподвижной.

Расчет влагонакопления в ограждающей конструкции в годовом цикле выполнен в соответствии с методикой (Корниенко, 2017).

Результаты и обсуждение

Климатологическое обеспечение зданий. Здания должны быть обеспечены климатическими характеристиками. Для расчетов влажностного режима ограждающих конструкций необходимо знать среднемесячные значения температуры и влажности наружного воздуха рассматриваемого пункта. Выбор среднемесячных значений климатических параметров обусловлен достаточно высокой степенью инерционности влажностного режима конструкций. СП 131.13330 «Строительная климатология» содержит обобщенные данные наблюдений на метеорологических станциях за период с 1966 по 2018 г. Указанные данные имеют высокую точность и могут быть использованы для расчетов ограждающих конструкций в многолетнем разрезе. Применительно к более коротким временным интервалам они менее точны вследствие изменений, связанных с глобальным потеплением, урбанизацией, формированием городских тепловых островов (Gorshkov et al, 2020; Korniyenko, 2022).

Как показано в международном стандарте ISO 13788, для оценки влагонакопления в ограждающих конструкциях в годовом цикле необходимо иметь данные метеорологических наблюдений за период не менее 10 лет. Используем архивные трехчасовые значения температуры и относительной влажности наружного воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2022 г., т. е. за 18 лет (рис. 4, 5).

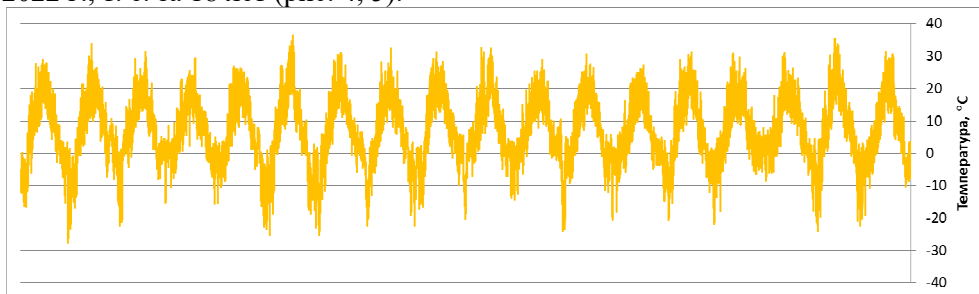


Рис. 4. График температуры наружного воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2022 г.

Анализ представленных климатических данных показывает, что период колебаний температуры и относительной влажности наружного воздуха равен 1 году. Более низкой температуре соответствуют более высокие значения относительной влажности воздуха.

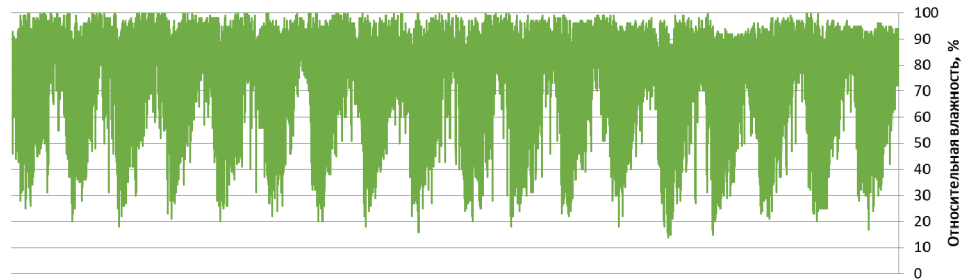


Рис. 5. График относительной влажности наружного воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2022 г.

По трехчасовым значениям климатических параметров рассчитаны среднemesячные значения температуры t_{ij} и относительной влажности φ_{ij} для каждого года рассматриваемого периода. Среднemesячные значения температуры t_j^{cp} и относительной влажности φ_j^{cp} за весь рассматриваемый период вычислены с использованием следующих формул:

$$t_j^{cp} = \frac{\sum_{i=2005}^{2022} t_{ij}}{18}, \quad i = 2005, 2006, \dots, 2022, \quad j = 1, 2, \dots, 12; \quad (2)$$

$$\varphi_j^{cp} = \frac{\sum_{i=2005}^{2022} \varphi_{ij}}{18}, \quad i = 2005, 2006, \dots, 2022, \quad j = 1, 2, \dots, 12. \quad (3)$$

Результаты расчета климатических параметров по формулам (2) и (3) представлены на рис. 6, 7. Для сравнения показаны данные СП 131.13330 на основе многолетних наблюдений на метеорологических станциях за период с 1966 по 2018 г.

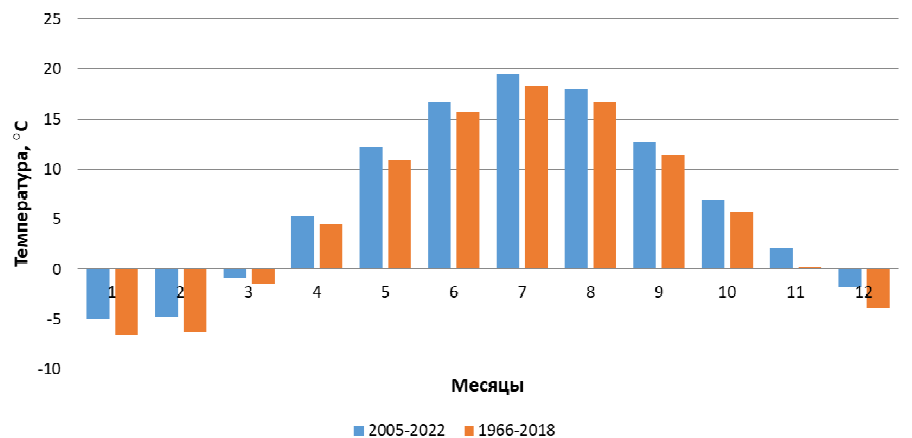


Рис. 6. Среднemesячные значения температуры наружного воздуха за различные периоды

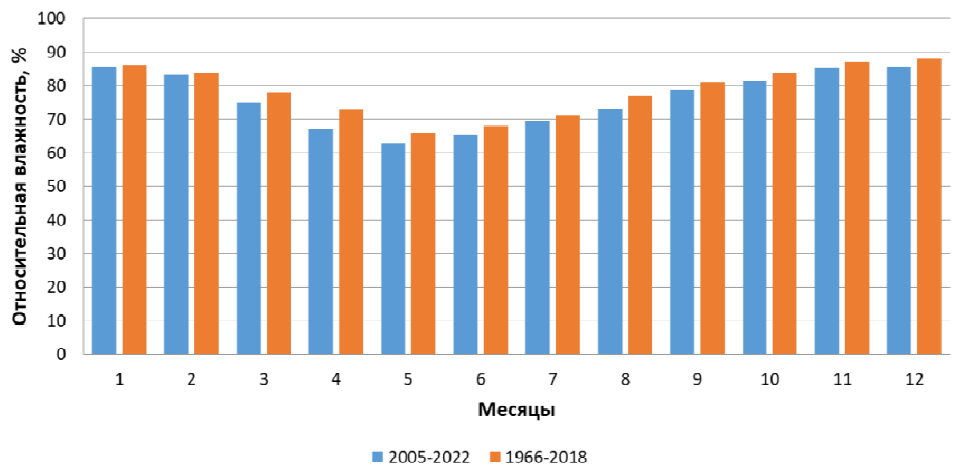


Рис. 7. Среднемесячные значения относительной влажности наружного воздуха за различные периоды

Анализируя рис. 6, можно отметить устойчивую тенденцию повышения температуры, усредненной за более короткий промежуток времени. Среднегодовая температура наружного воздуха за этот период составляет 6,7 °С, что выше по сравнению с периодом 1966—2018 гг. на 1,3 °С. Влажность незначительно снижается по сравнению с многолетними метеорологическими наблюдениями (см. рис. 7). Среднегодовая относительная влажность наружного воздуха за период 2005—2022 гг. составляет 76 %, что ниже по сравнению с периодом 1966—2018 гг. на 3 %.

Указанные характеристики наружного климата могут быть использованы для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций с учетом изменения температуры и относительной влажности в течение 2005—2022 гг.

Среднемесячные значения температуры и относительной влажности внутреннего воздуха вычислены путем аппроксимации данных ISO 13788, используя кусочно-линейные зависимости указанных параметров микроклимата от соответствующих характеристик наружного климата (Корниенко, 2016).

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Расчеты плоскости максимального увлажнения и влагонакопления в ограждающей конструкции в годовом цикле. Результаты расчета профилей действительного парциального давления водяного пара (p) и давления насыщенного водяного пара (p_{sat}) стеновой ограждающей конструкции в наиболее холодный месяц года при различных типах наружного штукатурного слоя представлены на рис. 8—10. По горизонтальной оси отложена пространственная координата в метрах, по вертикальной оси — давление водяного пара в Паскалях.

Как видно из рис. 8—10, линия действительного парциального давления водяного пара лежит ниже линии давления насыщенного водяного пара, что указывает на отсутствие плоскости конденсации в рассматриваемой конструкции при различных типах наружной штукатурки. Следовательно, конденсационное увлажнение стеновой конструкции при заданных граничных условиях отсутствует.

Таблица 2. Параметры наружного климата и микроклимата в жилой комнате (за период 2005—2022 гг.)

Месяц	Параметры наружного климата		Параметры микроклимата помещений	
	Температура, °С	Относительная влажность, %	Температура, °С	Относительная влажность, %
Январь	-5,0	85	20,0	35
Февраль	-4,8	83	20,0	35
Март	-0,9	75	20,0	39
Апрель	5,4	67	20,0	45
Май	12,1	63	20,1	52
Июнь	16,7	65	23,4	57
Июль	19,5	69	24,8	60
Август	18,0	73	24,0	58
Сентябрь	12,7	79	21,4	53
Октябрь	6,9	81	20,0	47
Ноябрь	2,1	85	20,0	42
Декабрь	-1,7	85	20,0	40

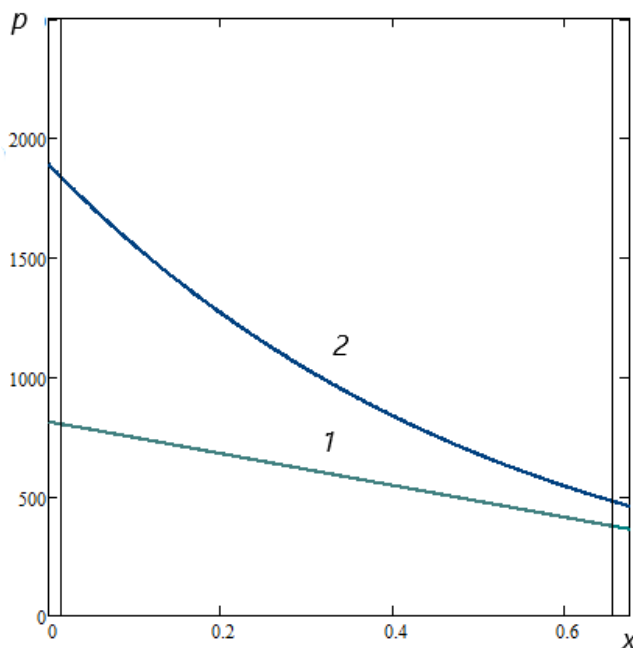


Рис. 8. Профили p и p_{sat} (соответственно 1 и 2) в стеновой конструкции с наружной штукатуркой из известково-песчаного раствора (тип 3.1) в январе

Однако, несмотря на отсутствие термической конденсации влаги, по мере удаления от внутренней поверхности конструкции происходит сближение профилей p и p_{sat} . Это означает повышение относительной влажности воздуха в порах материалов. Максимальное сближение профилей p и p_{sat} отмечается в плоскости максимального увлажнения — на стыке кирпичной кладки с наружной штукатуркой (рис. 8—10). Координата плоскости максимального ув-

лажнения $X_{\text{пмы}} = 0,02$ м, считая от наружной поверхности конструкции. Относительная влажность в этой плоскости достигает 78—80 %, т. е. мало меняется в зависимости от типа наружного штукатурного слоя.

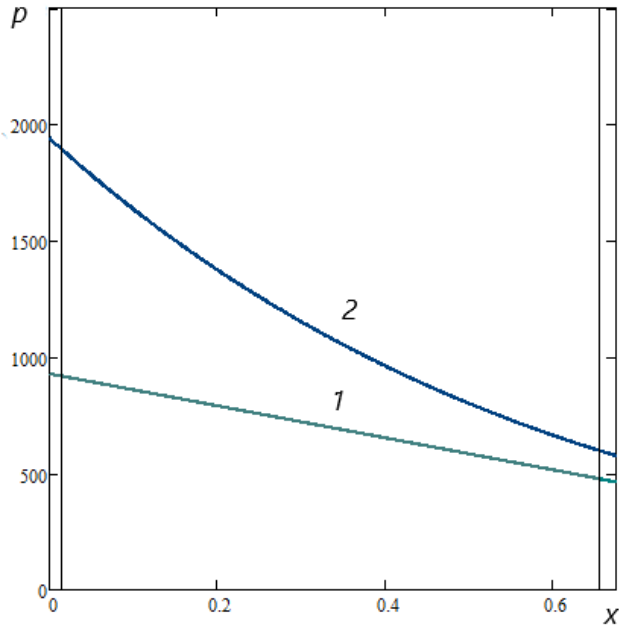


Рис. 9. Профили ρ и p_{sat} (соответственно 1 и 2) в стеновой конструкции с наружной штукатуркой из сложного раствора (тип 3.2) в январе

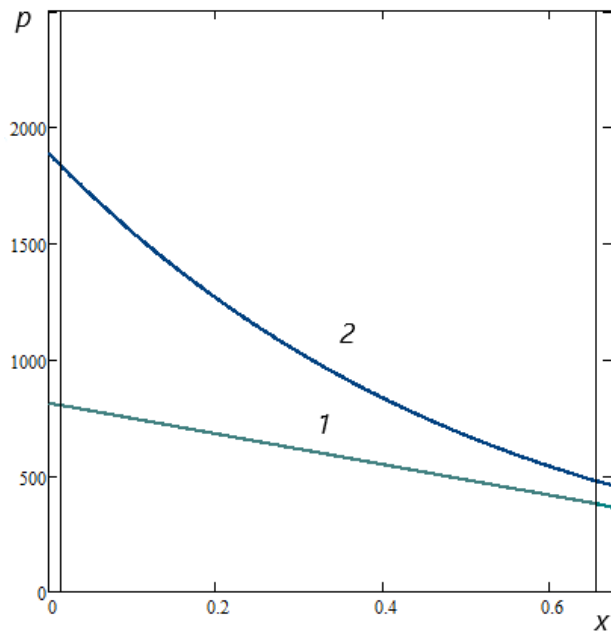


Рис. 10. Профили ρ и p_{sat} (соответственно 1 и 2) в стеновой конструкции с наружной штукатуркой из цементно-песчаного раствора (тип 3.3) в январе

Повышение относительной влажности приводит к росту сорбционной влажности материалов ограждающей конструкции. По изотермам сорбции установлены значения равновесной влажности материалов по массе, %: глиняного кирпича — 0,9; известкового раствора — 0,9; цементно-известкового раствора — 2,4; цементного раствора — 3,1.

Отрицательные приращения влаги в плоскости максимального увлажнения свидетельствуют об отсутствии влагонакопления в ограждающей конструкции в течение года (рис. 11) при всех рассматриваемых типах наружного штукатурного слоя.

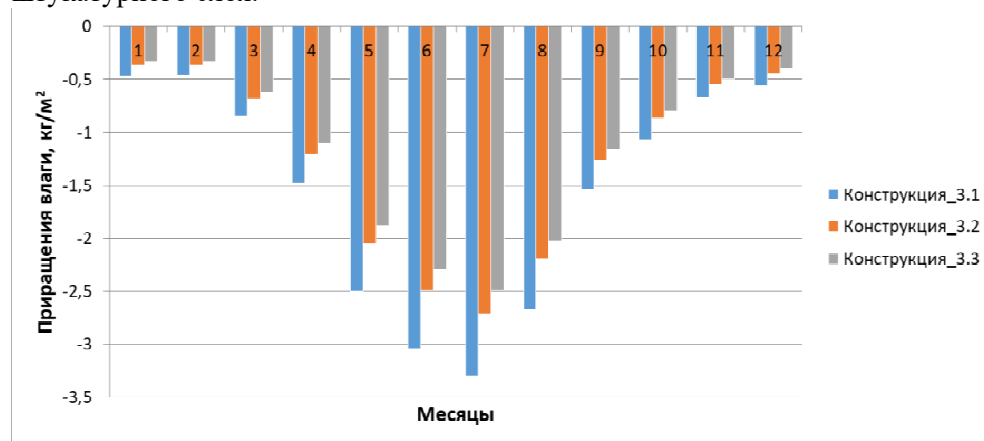


Рис. 11. Приращения влаги в плоскости максимального увлажнения стеновой конструкции в течение года

Существование плоскости максимального увлажнения подтверждается результатами экспериментального исследования модельной каменной кладки в климатической камере (Vatin et al, 2020). Расположение этой плоскости зависит от граничных условий. Так, при небольших отрицательных значениях температуры наружного воздуха и невысокой относительной влажности воздуха в помещении плоскость максимального увлажнения находится рядом с наружной поверхностью стены, конденсация влаги отсутствует. При понижении температуры наружного воздуха и одновременном повышении относительной влажности внутреннего воздуха плоскость максимального увлажнения смещается внутрь конструкции с образованием конденсата в этой плоскости. Криофаза влаги создает малопроницаемый для водяных паров барьер, что приводит к дальнейшему накапливанию влаги перед ним.

Расчет толщины наружного слоя резких колебаний температуры и теплового потока. При оценке колебательных воздействий климатических параметров (температуры и теплового потока) большое значение имеет так называемый слой резких колебаний. Он ограничен двумя плоскостями, одна из которых совпадает с наружной поверхностью конструкции, а в другой плоскости, расположенной в ее толще, амплитуда колебания температуры уменьшается в 2 раза по сравнению с наружной плоскостью. Из теории теплоусвоения известно, что в слое резких колебаний располагается примерно $1/8$ длины температурной волны.

Слой резких колебаний характеризуется тем, что для него показатель тепловой инерции равен единице ($D_{рк}=1$). Координату границы слоя резких ко-

лебаний, расположенную в толще рассматриваемой конструкции, можно определить по формуле (4):

$$X_{\text{рк(в)}} = \delta_{\text{шт}} + \frac{\lambda_{\text{кл}}}{s_{\text{кл}}} \left(1 - \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}} s_{\text{шт}} \right), \quad (4)$$

где $\delta_{\text{шт}}$ — толщина наружного штукатурного слоя; λ , s — соответственно расчетные значения теплопроводности и теплоусвоения материала (индексы «шт» обозначают принадлежность к наружной штукатурке, «кл» — к кирпичной кладке).

В формуле (4) принято, что начало координатной оси совпадает с наружной поверхностью стены.

Результаты расчета показывают, что показатель тепловой инерции внешнего штукатурного слоя $D_{\text{шт}} < 1$, но сумма показателей тепловой инерции штукатурного слоя и кирпичной кладки $D_{\text{шт}} + D_{\text{кл}} > 1$, следовательно, граница слоя резких колебаний расположена в слое кирпичной кладки ($X_{\text{рк(в)}} = 0,081$ м). Толщина слоя резких колебаний практически не зависит от типа наружной штукатурки.

Повышение влажности материалов, расположенных в слое резких колебаний, опасно. По результатам расчета установлено, что плоскость максимального увлажнения находится в слое резких колебаний, так как $X_{\text{пму}} < X_{\text{рк(в)}}$. Это означает, что стык кирпичной кладки и наружного штукатурного слоя подвержен теплотехническому риску.

Заключение

Научная новизна исследований заключается в установлении закономерности конденсационного увлажнения однослойных каменных стен с внутренним и наружным штукатурными слоями в условиях влажного климата, впервые полученной с учетом уточнения климатологического обеспечения зданий (температуры и относительной влажности наружного воздуха) за период с 2005 по 2022 г. Полученная закономерность, основанная на классической модели диффузии водяного пара в сорбирующей среде, отражает общие физические принципы увлажнения и сушки стеновых ограждающих конструкций при градиентах парциального давления водяного пара в порах материалов.

По итогам проведенного исследования сделаны следующие **выводы**.

1. На основании архивных трехчасовых значений температуры и относительной влажности наружного воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2022 г. уточнены среднеемесячные значения указанных климатических параметров. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций с учетом изменения температуры и относительной влажности в течение 2005—2022 гг.

2. Обнаружена плоскость максимального увлажнения в наиболее холодный месяц года, расположенная на стыке кирпичной кладки с наружным штукатурным слоем. Координата этой плоскости $X_{\text{пму}} = 0,02$ м, считая от наружной поверхности конструкции. Несмотря на отсутствие термической конденсации влаги при заданных граничных условиях, в этой плоскости отмечается рост сорбционной влажности материалов. Отрицательные приращения

влаги в плоскости максимального увлажнения свидетельствуют об отсутствии влагонакопления в ограждающей конструкции в течение года.

3. Применяя теорию теплоусвоения, определили границу слоя резких колебаний температуры и теплового потока. Граница слоя резких колебаний расположена в слое кирпичной кладки ($X_{pk(b)} = 0,081$ м).

4. Повышение влажности материалов, расположенных в слое резких колебаний, опасно. Расчетом установлено, что плоскость максимального увлажнения находится в слое резких колебаний. Это означает, что стык кирпичной кладки и наружного штукатурного слоя подвержен теплотехническому риску. Дальнейшие исследования связаны с необходимостью уточнения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций памятников архитектуры на основе динамического моделирования сложных процессов теплопереноса при комплексных климатических воздействиях, в том числе с учетом увлажнения косыми дождями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Ананьев А. И., Рымаров А. Г., Титков Д. Г. Теплотехнические свойства и долговечность наружных облицовочных слоев кирпичных стен зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 7. С. 22—30.

Горшков А. С., Ватин Н. И., Рымкевич П. П. Влияние антропогенных факторов на тепловое загрязнение городской среды // Энергосбережение. 2020. № 7.

Зимин С. С., Горшков Р. А., Войлоков И. А., Корниенко С. В. Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1297—1306.

Корниенко С. В. Совершенствование российских норм по влагозащите ограждающих конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 47 (66). С. 18—29.

Корниенко С. В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 132—145.

Кочев А. Г., Соколов М. М. Исследование исторических систем по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах // Приволжский научный журнал. 2021. № 4 (60). С. 96—100.

Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. 5-е изд. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

Andreotti M., Calzolari M., Davoli P., Pereira L.-D. Hygrothermal performance of an internally insulated masonry wall: Experimentations without a vapour barrier in a historic Italian Palazzo // Energy and Buildings. 2022. Vol. 260. P. 111896.

Ascione F., Ceroni F., De Masi R.-F., de' Rossi F., Pecce M.-R. Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment // Applied Energy. 2017. Vol. 185. Pp. 1517—1528.

Biseniece E., Žogla G., Kamenders A., Purviņš R., Kašs K., Vanaga R., Blumberga A. Thermal performance of internally insulated historic brick building in cold climate: A long term case study // Energy and Buildings. 2017. Vol. 152. Pp. 577—586.

Gorshkov A. S., Vatin N. I., Rymkevich P. P. Climate change and the thermal island effect in the million-plus city // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 89. DOI: 10.18720/CUBS.89.2.

Korniyenko S. Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd // MATEC Web of Conferences. 2016. P. 01003.

Korniyenko S. The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 114. Art. 11412. DOI: 10.34910/MCE.114.12.

Martinez-Molina A., Williamson K., Dupont W. Thermal comfort assessment of stone historic religious buildings in a hot and humid climate during cooling season. A case study // Energy and Buildings. 2022. Vol. 262. P. 111997.

Sovetnikov D. O., Baranova D. V., Borodinecs A., Korniyenko S. V. Technical problems in churches in different climatic conditions // Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. No. 1 (64). C. 20—35.

Vatin N., Korniyenko S. V., Gorshkov A. S., Pestryakov I. I., Olshevskiy V. Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 4 (96). Pp. 129—137.

Research Article

Sergey V. Korniyenko✉

Doctor of Engineering Sciences, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN), Head of the Department of Architecture of Buildings and Structures, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: skorn73@mail.ru; ORCID: 0000-0002-5156-7352

Rostislav A. Gorshkov

Student, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). 67, Bolshaya Morskaya st., Saint Petersburg, 190000, Russia;
e-mail: rostalsgor@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0489-4107

MOISTURE CONDENSATION IN MASONRY WALLS OF ARCHITECTURAL MONUMENTS UNDER HUMID CLIMATE

Abstract. The need to save cultural heritage for future generations makes the task of predicting the moisture of masonry walls of architectural monuments urgent. The average monthly values of climatic parameters required for calculation have been clarified. Despite the absence of moisture condensation under the specified boundary conditions, an increase in the sorption humidity of building materials was detected. The boundary of the layer of temperature and heat flux fluctuations in masonry was determined. Increasing the humidity of materials located in this layer is dangerous. The calculation demonstrates that the plane of maximum humidification is located in this layer. This means that the joint of the brickwork and the outer plaster layer is subject to thermal risk. Further studies are related to the need to clarify the thermal characteristics of the enclosing structures of architectural monuments based on dynamic modeling of complex heat and mass transfer processes under complex climatic impacts, including taking into account humidification by oblique rains.

Key words: architecture, cultural heritage object, architectural monument, enclosing structure, moisture condensation, moisture accumulation, climate.

For citation: Korniyenko S. V., Gorshkov R. A. (2023) Moisture condensation in masonry walls of architectural monuments under humid climate. *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology], no. 2, pp. 44—58 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520_2023_2_44

REFERENCES

- Ananiev A. I., Rymarov A. G., Titkov D. G. (2021) Thermotechnical properties and durability of external facing layers of brick walls of buildings. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo* [Industrial And Civil Engineering], no. 7, pp. 22—30 (in Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.07.22-30.
- Andreotti M., Calzolari M., Davoli P., Pereira L.-D. (2022) Hygrothermal performance of an internally insulated masonry wall: Experimentations without a vapour barrier in a historic Italian Palazzo. *Energy and Buildings*, vol. 260, p. 111896.
- Ascione F., Ceroni F., De Masi R.-F., de' Rossi F., Pecce M.-R. (2017) Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment. *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1517—1528.
- Biseniece E., Žogla G., Kamenders A., Purviņš R., Kašs K., Vanaga R., Blumberga A. (2017) Thermal performance of internally insulated historic brick building in cold climate: A long term case study. *Energy and Buildings*, vol. 152, pp. 577—586.
- Fokin K. F. (2006) *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdanii* [Construction heat engineering enclosing parts of buildings]. 5th ed. Moscow: AVOK-PRESS. 256 p. (in Russian).
- Gorshkov A. S., Vatin N. I., Rymkevich P. P. (2020) Climate change and the thermal island effect in the million-plus city. *Construction of Unique Buildings and Structures*, vol. 89. DOI: 10.18720/CUBS.89.2.
- Gorshkov A. S., Vatin N. I., Rymkevich P. P. (2020) Impact of anthropogenic factors on thermal pollution of the urban environment. *ABOK*, no. 7 (in Russian).
- Kochev A. G., Sokolov M. M. (2021) Research of historical systems for creating and maintaining a microclimate in Orthodox churches. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], no. 4, pp. 96—100 (in Russian).
- Kornienko S. V. (2016) Specification of indoor climate design parameters at the assessment of moisture protective properties of enclosing structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture], no. 11, pp. 132—145 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145.
- Kornienko S. V. (2017) Improvement of the Russian norms on moisture protection of the building envelope components. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], iss. 47(66), pp. 18—29 (in Russian).
- Korniyenko S. (2016) Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd. *MATEC Web of Conferences*. P. 01003.
- Korniyenko S. (2022) The influence of the sky radiative temperature on the building energy performance. *Magazine of Civil Engineering*, no. 114, art. 11412. DOI: 10.34910/MCE.114.12.
- Martinez-Molina A., Williamson K., Dupont W. (2022) Thermal comfort assessment of stone historic religious buildings in a hot and humid climate during cooling season. A case study. *Energy and Buildings*, vol. 262, p. 111997.
- Sovetnikov D. O., Baranova D. V., Borodinecs A., Korniyenko S. V. (2018) Technical problems in churches in different climatic conditions. *Construction of Unique Buildings and Structures*, no. 1 (64), pp. 20—35.
- Vatin N., Korniyenko S. V., Gorshkov A. S., Pestryakov I. I., Olshevskiy V. (2020) Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete. *Magazine of Civil Engineering*, no. 4 (96), pp. 129—137.
- Zimin S. S., Gorshkov R. A., Voilokov I. A., Kornienko S. V. (2022) Causes of cracks in the plaster of unheated stone buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture], vol. 17, no. 10, pp. 1297—1306 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306.

Поступила в редакцию 11.06.2023
Принята в печать 27.06.2023

Received 11.06.2023
Accepted for publication 27.06.2023