



Оптимальные параметры внутреннего воздуха исторических зданий: методика определения

Ю.А. Табунщиков, доктор техн. наук, профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), президент НП «АВОК»

М.М. Бродач, кандидат техн. наук, профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), вице-президент НП «АВОК»

Ключевые тела: музей, историческое здание, церковь, температура внутреннего воздуха, влажность, микроклимат, оптимальные параметры внутреннего воздуха, допустимые параметры внутреннего воздуха

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных исследованию исторических зданий, в том числе зданий церковного и музейно-церковного назначения, показал, что наиболее спорным вопросом в области мониторинга исторических зданий являются «оптимальные параметры внутреннего воздуха», которые должны обеспечить долговременную сохранность произведений искусства [1–9].

Введем термин «историческое здание» – он означает здание музейного, церковного или церковно-музейного назначения, включая находящиеся в нем предметы, которое представляет архитектурную и/или историко-художественную ценность. Проблема назначения «оптимальных параметров внутреннего воздуха» имеет место как для исторических, так и для многочисленных современных музейных зданий. Хранители

практически каждого музея имеют на этот счет свое убежденное мнение, «не подлежащее критике и обсуждению». В результате в литературе есть много «таблиц», которые рекомендуют «оптимальные параметры внутреннего воздуха», часто существенно различные. Большинство исследователей рекомендуют для исторических, в том числе музейно-церковных зданий, оборудованных системой кондиционирования воздуха, следующий

диапазон изменения температуры внутреннего воздуха – 16–22 °С и диапазон изменения влажности внутреннего воздуха – 45–55 % [1–3].

Представляется, что причина такой ситуации кроется в отсутствии научно-обоснованной методики определения «оптимальных параметров внутреннего воздуха», которые должны обеспечивать долговременную сохранность исторических зданий. Представляется также, что эти значения зависят от многих факторов: возраста здания, характера экспонатов, системы климатизации, внутреннего температурно-влажностного режима, режима эксплуатации здания, климатических условий места расположения здания и т. д.

В соответствии со Стандартом АВОК «Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха» термины «оптимальные параметры внутреннего воздуха» и «допустимые параметры внутреннего воздуха», опуская их части, относящиеся к людям, имеют следующее определение: **оптимальные параметры внутреннего воздуха** не вызывают влажностные или температурные деформации, оказывающие отрицательное влияние на долговременную сохранность станковой живописи, художественной росписи, декоративной отделки и предметов культовых обрядов, представляющих историко-культурную ценность; **допустимые параметры внутреннего воздуха** не вызывают влажностные или температурные деформации, приводящие к быстрому разрушению станковой живописи, художественной росписи, декоративной отделки и предметов культовых обрядов, представляющих историко-культурную ценность.

Особый случай представляют неотапливаемые здания музейно-церковного назначения – для них в известной литературе вообще отсутствует определение «оптимальные и допустимые параметры внутреннего воздуха» и, следовательно, не приводятся их численные значения.

Дадим определение термина: **допустимые параметры внутреннего воздуха в неотапливаемых храмах церковно-музейного назначения** – верхние и нижние значения температуры и влажности внутреннего воздуха, в области изменения которых не происходит систематического появления значительных влажностных и температурных деформаций, приводящих к быстрому невосполнимому разрушению настенной фресковой живописи, деревянного иконостаса, икон и других предметов церковной утвари, представляющих историко-культурную ценность.



РАСШИРЯЕТ СВОЮ ПРОДУКТОВУЮ ЛИНЕЙКУ ОБОРУДОВАНИЕМ CLIMAVENETA



A Group Company of MITSUBISHI ELECTRIC

Climaveneta — европейский лидер в сфере кондиционирования, отопления и вентиляции с 40-летней историей.

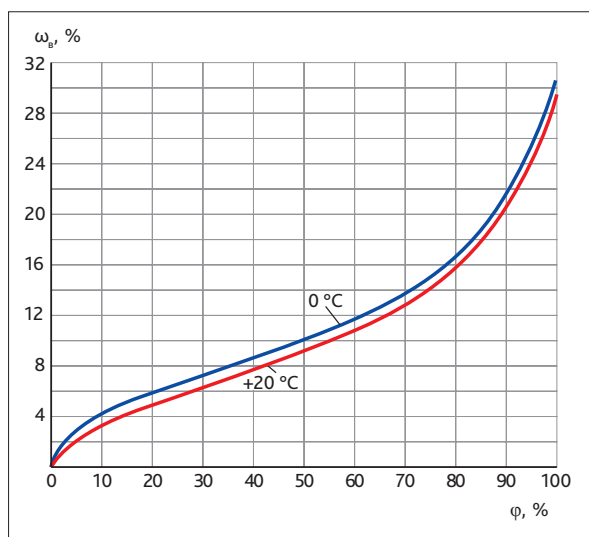
С 2015 года компания входит в состав Mitsubishi Electric Corporation

aircon@mer.mee.com

Таким образом из приведенных выше определений следует, что установление оптимальных и допустимых параметров внутреннего воздуха связано с установлением минимальных значений деформаций, обеспечивающих долговременную сохранность предметов искусства. Приведем здесь основные положения методики установления оптимальных параметров внутреннего воздуха исторических зданий на основе изучения деформативных характеристик предметов искусства.

Каждое музейное, церковное или музейно-церковное здание при его рассмотрении как единого комплекса с точки зрения изучения температурно-влажностного режима состоит из ограждающих конструкций и экспонатов различного характера: картин, скульптур, внутреннего убранства, или для церквей: икон, фресок, деревянного иконостаса, церковной утвари. Все перечисленные выше составляющие исторических зданий объединены одним характерным показателем: они являются капиллярно-пористыми телами, содержащими влагу. В табл. 1 и табл. 2 [10] приведены характерные величины пористости и нормальной влажности некоторых строительных материалов.

В процессе эксплуатации здания при колебаниях температуры и влажности внутреннего



■ Рис. 1. Изотерма сорбции водяного пара древесины

воздуха внутренние поверхности ограждающих конструкций, а также находящиеся в здании экспонаты, представляющие историко-художественную ценность, поглощают влагу из окружающего воздуха, которая содержится в нем в виде пара. Этот процесс называется сорбцией.

Зависимость между влажностью материала по массе¹ и относительной влажностью воздуха

Таблица 1

Характерные величины пористости некоторых типичных строительных материалов

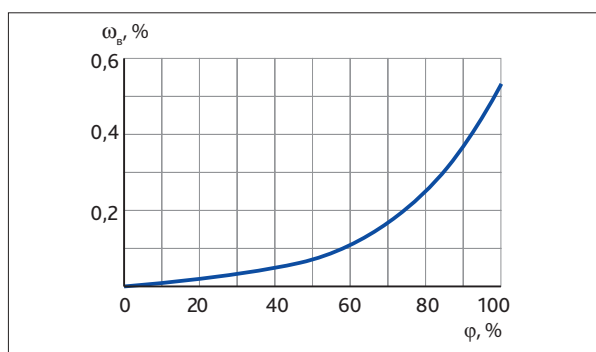
Материал	Объемный вес, кг/м ³	Пористость, %
Кирпич красный	2100	20
	1700	37
Дуб	700	58
Сосна	500	65
Береза	600	57
Осина	400	75

Таблица 2

Нормальные значения влажности материалов в наружных ограждающих конструкциях

Материал	Плотность, кг/м ³	Влажность материала, %	
		по массе	объемная
Кирпич красный в сплошных стенах	1800	1,5	2,7
Штукатурка известковая – песчаная	1600	1	1,6
Дерево (сосна)	500	15	7,5

¹ Влажность материала по массе ω_b , %, определяется отношением массы влаги, содержащейся в образце материала, к массе образца в сухом состоянии.



■ Рис. 2. Изотерма сорбции водяного пара обыкновенного кирпича

изображается графически в виде изотерм сорбции. Изотермы сорбции для дерева (рис. 1) и кирпича (рис. 2) показывают, что влажность материалов по массе увеличивается с повышением относительной влажности воздуха [10].

Кирпич и дерево, сорбционные показатели которых приведены выше, будем называть новыми строительными материалами в отличие от «старых строительных материалов» в наружных ограждающих конструкциях, иконах и деревянном иконостасе, возраст которых может достигать нескольких веков. Установлено, что сорбционные, а следовательно, и деформативные характеристики старых строительных материалов и изделия из них существенно отличаются от аналогичных новых строительных материалов и изделий из них [11].

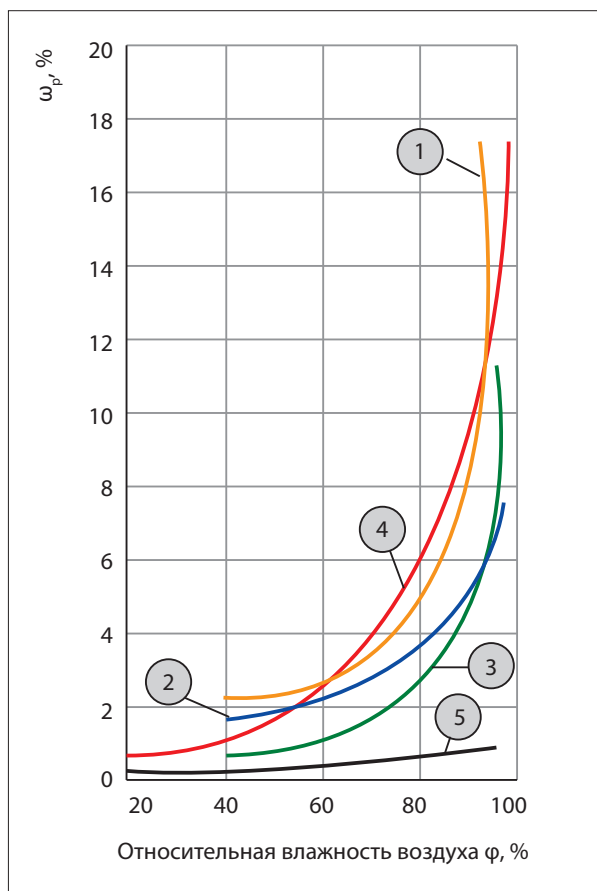
Исследование температурно-влажностного режима и теплофизических свойств ограждающих конструкций соборов Московского Кремля

в период устройства в них систем кондиционирования воздуха выявили следующие особенности сорбционных показателей старых строительных материалов ограждающих конструкций [11]:

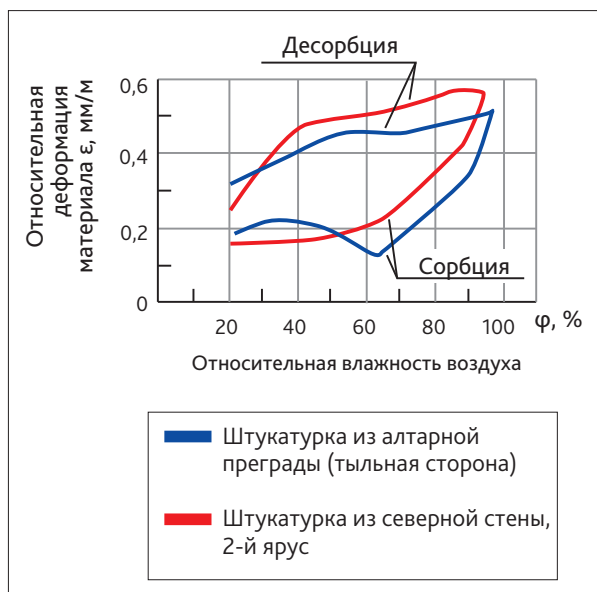
- сорбционные кривые образцов кирпича, взятого из стен Успенского и Архангельского соборов (старые строительные материалы), обладают более высокой равновесной влажностью, чем аналогичные современные материалы. Так, максимальная гигроскопическая влажность (т.е. влажность, соответствующая полному насыщению воздуха при данной температуре) красного кирпича, взятого из стен соборов Московского Кремля, составляет 9–18%. Эта величина для современного красного кирпича, в том числе для кирпича, который использовался для реставрационных работ в Московском Кремле, не превышает 1–1,8%. Повышенная сорбционная влажность обусловлена, очевидно, значительным содержанием солей в строительных материалах, эксплуатируемых в течение нескольких веков. Для проверки этого предположения были определены сорбционные характеристики образцов кирпича, специально изготовленных для реставрации ограждающих конструкций кремлевских соборов, которые предварительно были пропитаны солями Na_2SO_4 и MgSO_4 . Сорбционные характеристики материалов, взятых из стен соборов, и материалов, искусственно засоленных, как следует из рис. 3, достаточно близки друг к другу.

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. В связи с тем что «старые





■ Рис. 3. Изотермы сорбции образцов красного кирпича. 1, 2, 3 – образцы, взятые из стен собора; 4 – образец реставрационный, искусственно засоленный смесью Na_2SO_4 и MgSO_4 ; 5 – реставрационный, незасоленный образец



■ Рис. 4. Кривые относительных деформаций материала штукатурки стен Успенского собора

строительные материалы» содержат соли, накопленные в течение длительного периода их эксплуатации, т. е. являются «засоленными», температура точки росы на внутренней поверхности ограждающей конструкции будет выше по сравнению с температурой точки росы конструкций из «новых строительных материалов».

Кривые относительных деформаций образцов штукатурки, взятых из стен Успенского собора-музея, приведены на рис. 4. Относительная деформация представляет собой отношение изменения линейного размера образца Δl в мм к его линейному размеру в абсолютно сухом воздухе ($\varphi = 0\%$). Из рис. 4 видно, что наиболее значительное увеличение относительной деформации этого материала отмечается в диапазоне изменения относительной влажности воздуха от 60 до 90% в процессе сорбционного увлажнения. При десорбции влаги из образцов штукатурки, т. е. при усушке материала, наблюдается несколько иная картина: в интервале изменения относительной влажности воздуха от 40 до 90% величина относительных деформаций изменяется незначительно, а в интервале изменения относительной влажности воздуха от 20 до 40% наблюдаются значительные изменения относительных деформаций. Также было установлено, что кривые относительных деформаций белого камня имеют подобный, но менее ярко выраженный характер. Кроме того, было установлено, и это очень важно, что влажностные деформации во много раз превышают температурные деформации образцов материалов штукатурки и белого камня.

Таким образом, причиной нарушения долговременной сохранности музейных и церковных экспонатов, а также фресковой живописи являются влажностные и температурные деформации материалов экспонатов и фресковой живописи.

Следовательно, задача обеспечения долговременной сохранности произведения искусства состоит в том, чтобы определить и обеспечить при эксплуатации такие параметры внутреннего воздуха, при которых деформации будут отсутствовать или будут иметь допустимые значения.

Если здание оборудовано системой кондиционирования воздуха, то в соответствии с рис. 4 можно было бы рекомендовать поддерживать относительную влажность внутреннего воздуха в диапазоне 40–55%. Однако это является предварительным результатом: чтобы принять окончательное решение о диапазоне изменения относительной

Таблица 3

Примерные значения влагосодержания наружного воздуха в г/кг для летнего и зимнего периодов года

Период года	Влагосодержание наружного воздуха г/кг для городов			
	Москва	Санкт-Петербург	Ярославль	Ростов-на-Дону
Зимний	1,1	1,5	1,1	1,3
Летний	10	9,5	10	10,5

влажности, необходимо провести исследования деформативных показателей образцов других материалов, которые находятся в историческом здании и представляют архитектурную или историко-художественную ценность.

Если историческое здание оборудовано системой кондиционирования воздуха, то имеется возможность поддерживать влажностное состояние внутреннего воздуха на заданном уровне. В отапливаемом здании, не оборудованном системой кондиционирования воздуха, влажностное состояние внутреннего воздуха непосредственно связано с влажностным состоянием наружного воздуха за счет естественного или принудительного вентиляционного воздухообмена. В летнее время наружный воздух имеет высокое влагосодержание (табл. 3) и, попадая свободно в помещение здания, абсорбируется внутренними поверхностями ограждающих конструкций, иконостасом и иконами, а в зимнее время наружный воздух имеет существенно более низкое влагосодержание, т.е. является практически сухим, и при отоплении помещения за счет разности парциальных давлений пара во влажном воздухе и на внутренней поверхности ограждающих конструкций или на поверхности предметов,

представляющих историко-художественную ценность, обуславливает процесс интенсивной сушки. В табл. 3 приведены примерные значения влагосодержания наружного воздуха в г/кг для летнего (июнь-август) и зимнего (декабрь-февраль) периодов года для городов: Москва, Санкт-Петербург, Ярославль, Ростов-на-Дону.

При насыщении «сухого» капиллярно-пористого тела влагой в летнее время происходит процесс так называемого набухания, т.е. увеличения размеров тела, что, в свою очередь, обуславливает появление деформаций, которые называются влажностными деформациями и которые могут приводить при значительных их величинах к разрушению структуры материала. При испарении влаги из «влажного» капиллярно-пористого тела в зимнее время происходит обратный процесс, называемый усушкой, который при его интенсивном или существенно высоком ведении также вызывает деформации и также может приводить к разрушению структуры материала или изделий из него. Аналогичные явления имеют место при изменении температуры материала.

Таким образом, в случае оборудования здания только системой отопления и вентиляции за



Одна из самых больших проблем Сикстинской капеллы – поступление теплоты, влаги и соли от человеческих тел. Каждый из 25 000 дневных посетителей нагревает помещение, как лампочка мощностью в 80 Вт. Соль и влага оседают на росписях XV–XVI веков. Соль, оседающая на фресках, удаляется с помощью дистиллированной воды и тонкой японской бумаги. На поверхность картин кистью наносят тонкую пленку воды, которая впитывает соль. Затем раствор промокают бумагой.

Температура в зале должна находиться в пределах 22–24 °С, а влажность – 55–60 %. Для измерения температуры, влажности и количества посетителей в Сикстинской капелле размещены 30 скрытых датчиков.

Специалисты регулярно простукивают стены, чтобы убедиться, что штукатурка не отделяется от кладки. Они также проверяют, не отслаивается ли красочный слой.

счет регулярных процессов «набухания» в летнее время и «усушки» в зимнее время будут иметь место знакопеременные деформации, приводящие к нарушению долговременной сохранности исторических зданий и расположенных в них предметов, представляющих историко-художественную ценность.

Выводы

1. Оптимальные или допустимые параметры внутреннего воздуха для исторических зданий, в том числе для зданий церковного и музейно-церковного назначения, следует устанавливать на основе изучения изменения сорбционных и деформативных показателей материалов внутренней поверхности ограждающих конструкций и материалов произведения искусства.

2. Следует ожидать, что оптимальные параметры внутреннего воздуха будут различны для каждого исторического здания или же могут совпадать для некоторых из них и будут зависеть от многих факторов, в том числе от возраста здания, характера экспонатов, особенностей эксплуатации здания, системы обеспечения микроклимата и т. д.

Изложенное выше позволяет рекомендовать следующую пошаговую методику установления оптимальных параметров температуры внутреннего воздуха для исторических зданий.

- Необходимо отобрать образцы материалов экспонатов исторических зданий, а также материалов внутренних поверхностей ограждающих конструкций. Учитывая художественную ценность экспонатов, образцы отбираются минимально необходимых для исследования размеров.
- Необходимо изучить сорбционные показатели образцов материалов, ориентируясь, например, на методику ГОСТ 24816–14 «Международный стандарт. Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности».
- Необходимо изучить деформативные показатели материалов, ориентируясь, например, на методику и оборудование, изложенные в [2] или на другие более современные методики или оборудование.
- Необходимо выполнить сравнительный анализ деформативных и сорбционных кривых образцов материалов и выбрать такие их значения,

в области изменения которых деформативные показатели меняются незначительно. Эти значения и будут определять оптимальные значения температуры внутреннего воздуха для исторического здания.

Литература

1. Camuffo D. Microclimate for Cultural Heritage. Developments in Atmospheric Science, 23, Elsevier, 1998, 420 p.
2. Camuffo D., Bernardi A. The Microclimate of the Sistine Chapel, Rome BOLLETTINO GEOFISICO. Anno 18, Numero 2, Aprile–Giugno, January, 1995, p. 7–33.
3. Negroa E., Cardinaleb T., Cardinalea N., Rospi G. Italian guidelines for energy performance of cultural heritage and historical buildings: the case study of the Sassi of Matera. European Geosciences Union General Assembly 2016, EGU Division Energy, Resources & Environment, ERE. Energy Procedia 97 (2016), p. 7–14.
4. Popper R., Niemz P., Croptier S. Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species analysis with the Hailwood–Horrobin model to describe the sorption hysteresis. WOOD RESEARCH 54 (4):200943–56.
5. Camuffo D., Bertolin C., Fassina V. Microclimate monitoring in a Church. Environmental chapter 3. Environment 01/06/10 10.24 Pagina 43.
6. Vasilyev G. P., Lichman V. A., Peskov N. V., Brodach M. M., Tabunshchikov Y. A., Kolesova M. V. Simulation of heat and moisture transfer in a multiplex structure, Energy and Buildings 86 (2015), p. 803–807.
7. Cardinale T., Rospi G., Cardinale N. The influence of indoor microclimate on thermal comfort and conservation of artworks: the case study of the Cathedral of Matera (South Italy). Energy Procedia 59 (2014), p. 425–432.
8. Бродач М. М. Отопление соборов – практика альтернативных решений // АВОК. – 2004. – № 2.
9. Сизов Б. Т. Теплофизические аспекты сохранения памятников архитектура // АВОК. – 2002. – № 1. С. 24–31.
10. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006.
11. Табунщиков Ю. А., Дахно В. Н., Мельникова И. С., Проценко В. Н. Тепловой режим памятников архитектуры (на примере соборов-музеев Московского Кремля) : сб. «Строительная теплофизика (микроклимат и теплоизоляция зданий)». М.: НИИФ, 1979. ■