

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.1 : 726.5

А. Г. КОЧЕВ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплогазоснабжения;
М. М. СОКОЛОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения;
В. А. УВАРОВ, аспирант кафедры теплогазоснабжения

СОЗДАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д.65. Тел.: (831) 433-45-35;
факс: (831) 430-03-82; эл. почта: kochev.1961@mail.ru

Ключевые слова: православные храмы, температурные условия, микроклимат, тепловая инерция, теплоустойчивость, системы отопления.

Приводятся экспериментальные данные и теоретические результаты, полученные по уравнениям и зависимостям свободного конвективного теплообмена на внутренней поверхности наружных стен православных храмов. Рассмотрены основные виды систем отопления для соборов и церквей.

Православные храмы относятся к памятникам историко-культурного наследия, содержащих огромное богатство, состоящее из монументальных сооружений, станковой живописи (икон), предметов культовых обрядов, ценных реликвий, росписей, являющихся произведениями искусства, не уступающих документам и предметам, хранящимся в музеях и исторических зданиях.

Сроки долговечности памятников культурного наследия зависят от значений наружной температуры, относительной влажности регионального климата, от средних значений параметров, частоты и величины их колебаний [1].

Большинство предметов, используемых в церковных обрядах являются произведениями искусства. Материалы этих предметов реагируют на температуру внутренней среды и на относительную влажность [2]. Так, любое изменение температуры внутри храма приводит к деформационным изменениям произведений, определяемым коэффициентом расширения материала и поверхности.

Равновесное содержание влаги в гидрофильных материалах связано с относительной влажностью воздуха, так как при повышении уровня влаги материал поглощает воду и набухает, когда же влажность падает, уровень влаги в произведении уменьшается, и материал сжимается.

В таких условиях при наличии макро- и микротрещин материалы подвергаются чрезвычайно высоким напряжениям, вызывающим текучесть и разрывы на их поверхности, что в большинстве случаев в старых конструкциях приводит к внутренним напряжениям и трещинам, то есть к старению росписей (рис. 1).

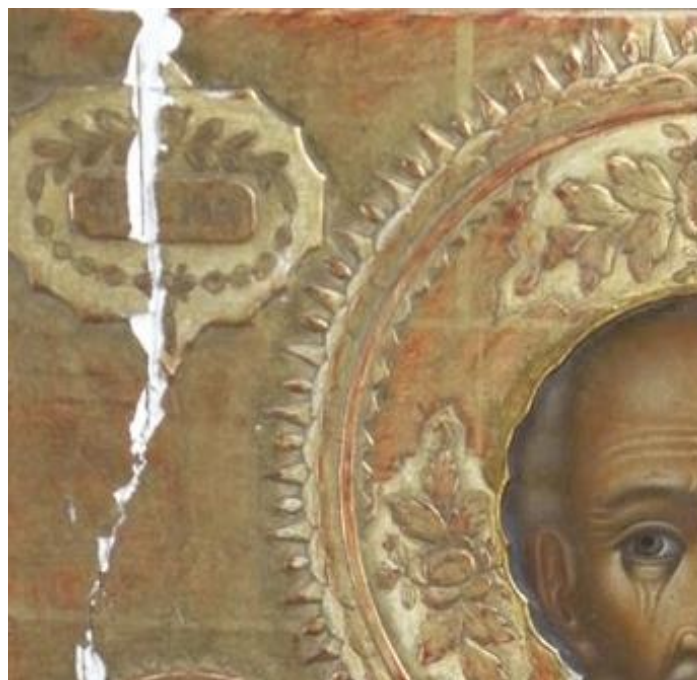


Рис. 1. Старение росписей на поверхности стен храмов

Лабораторные исследования канадского ученого Стефана Михальски [3], проведенные на гидрофильных материалах, показывают, что изменение относительной влажности при постоянной температуре более опасно для старинных изображений, чем изменения температуры при постоянной влажности, следовательно, ключевой переменной для дерева, бумаги, кожи, текстиля и других органических материалов является влажность, однако, она зависит как от температуры, так и от содержания влаги в воздухе.

При работе системы отопления рост температуры вызывает падение относительной влажности воздуха. В нестационарных условиях любой объект в силу собственной тепловой инерции и теплоустойчивости будет иметь разную температуру и разную относительную влажность на границе раздела двух сред (поверхность объекта – воздух).

Геометрическая адаптация материалов к изменчивому микроклимату храма происходят циклами, типичными для окружающей среды храма. Как только внутренние изменения прекращаются, то деформации становятся необратимыми из-за старения материалов, потери эластичности, а наличие водяных паров приводит к образованию грибковой плесени. Все это наносит огромный ущерб произведениям искусства, особенно иконам и росписям.

Изменчивость микроклимата в переходные периоды года, создаваемая системой отопления с периодическим действием (пропусками), и конвективные потоки, взаимодействующие с холодными безынерционными поверхностями, с конденсацией водяного пара могут увеличить скорость осаждения пыли и копоти, то есть почернение и порчу икон, фресок, росписей, лепнины и холстов (рис. 2).



Рис. 2. Осаждение пыли и копоти на иконах, стенах с росписями и лепнине

Основные механизмы осаждения: термодиффузия и электростатическая поляризация из-за трения. Внутренними источниками сажи дыма является горение ладана и свечей, также прихожане на своей обуви и одежде вносят частицы примесей, большое количество атмосферной пыли попадает в храм через открывающиеся дверные и оконные проемы. Ситуация еще более осложняется при наличии пристроенной к храму котельной с пламенным генератором теплоты, работающим на газе, жидком или твердом топливе, дополнительно выделяющим загрязняющие вещества и сажу [4].

Поэтому в православных храмах необходимо создавать комбинированные системы с панельно-лучистым и конвективным отоплением. Большинство зимних или круглогодичных (даже некоторых летних) православных храмов XVII – XX веков в средней и северных регионах России имели именно такие водяные и дымно-воздушные системы отопления. Радиационное излучение нагретых поверхностей и отопительных приборов равномерно нагревало окружающие предметы и их поверхности в храме. Это вызывало распределенные конвективные движения воздуха внутри храма и исключало контакт внутреннего загрязненного воздуха с росписями, лепниной и иконами на внутренних поверхностях наружных стен [5].

При рассмотрении температурных режимов четырех православных храмов нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения температурных полей по внутренней поверхности наружных стен с большой инерционностью и разными типами отопительных приборов. Основные закономерности и уравнения свободного конвективного теплообмена являются результатом экспериментов и теоретических выводов, справедливых для идеальных условий [1, 6, 7, 8].

В реальных условиях помещения возможно нарушение идеальной картины свободного конвективного теплообмена вследствие воздействия таких факторов, как замкнутый или ограниченный объем, наличие нескольких холодных и нагретых теплообменивающих поверхностей. Особенно это заметно на уровне размещения станковой живописи из-за наличия теплопроводных включений (дюбелей) для вешивания икон.

Подвижность воздуха в храмах с доминирующей вертикальной планировкой при свободной конвекции в помещении связана с тем, что на интенсивность



движения конвективного потока около поверхности влияет общая подвижность воздуха в помещении, также применяемые типы отопительных приборов.

Все рассмотренные положения и формулы конвективного теплообмена строго справедливы для расчета теплообмена на изотермической поверхности. Часто температура поверхности по направлению движения потока воздуха изменяется, или поток воздуха изменяет свою температуру. Эккерт Э. Р. провел подробный анализ и предложил в [8] метод расчета такого режима теплообмена. Результаты выполненных им расчетов позволяют сделать вывод, важный для практики инженерных решений: температурная предыстория потока значительно больше сказывается при ламинарном режиме, чем при турбулентном. Для турбулентного режима ее можно не учитывать и определять локальные значения теплообмена по режиму в данном сечении.

Средний теплообмен по всей площади может быть рассчитан суммированием локальных значений в предположении их ступенчатого изменения по направлению движения. В общем случае, если расчетная разность температур по направлению потока уменьшается, то коэффициент теплоотдачи α_k оказывается меньше, чем при среднем температурном напоре.

Согласно данным [9] эффекты шероховатости довольно малы при ламинарном и переходном режимах. При наиболее высоких числах Рейнольдса коэффициент трения зависит только от шероховатости и почти не зависит от числа Рейнольдса и, следовательно, от вязкости [9, 10].

При вынужденной конвекции в жидкости с постоянными физическими свойствами течение не зависит от поля температур и, следовательно, от переноса энергии. В случае естественной конвекции задача всегда является совместной, так как течение возникает в первую очередь, в результате переноса энергии и образования вследствие этого поля температур.

Основные уравнения естественной конвекции образуют систему эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных и поэтому являются довольно сложными. Основные трудности решения этих уравнений связаны с необходимостью учета изменений плотности ρ в зависимости от температуры или концентрации и с эллиптичностью системы уравнений в частных производных [10].

Среди конвективных струй можно выделить два общих класса течения: свободные конвективные струи и пристеночные конвективные струи.

Основная задача исследования состояла в изучении последовательных стадий развития полей скорости и температуры, начиная от примыкающей к нагретой поверхности области и кончая областью полностью развитого (автомодельного) течения.

Определяющие уравнения для турбулентных течений характеризуются в общем случае сильной нелинейностью, а численные свойства нелинейных дифференциальных уравнений ещё недостаточно изучены. Для турбулентных течений справедливы те же уравнения сплошности, движения и энергии, которые описывают ламинарные течения. Единственное различие между соответствующими двумя системами уравнений заключается лишь в том, что при турбулентных течениях зависимые переменные (например, V_x , V_y , p и t) интерпретируются как мгновенные величины (при осреднении по времени), каждая из которых в соответствии с аппроксимирующим выражением представляется суммой осредненного значения и пульсации, причем



предполагается, что осреднения как по времени, так и по ансамблю эквивалентны (эргодическая гипотеза). Тогда подстановка аппроксимирующих соотношений в уравнения сплошности, движения и энергии, описывающие ламинарное двумерное течение несжимаемой жидкости в режиме естественной конвекции с учетом дифференцирования по времени, дает следующие зависимости:

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0, \\ \frac{Dv_x}{D\tau} &= \beta \cdot g \cdot (t - t_\infty) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (v \cdot \nabla v_x) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{v_x'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v_x'v_y'}, \\ \frac{Dv_y}{D\tau} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (v \cdot \nabla v_y) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{v_x'v_y'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v_y'^2}, \\ \frac{Dt}{D\tau} &= \nabla \cdot (a \cdot \nabla t) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{t'v_x'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{t'v_y'}.\end{aligned}$$

При выводе этих уравнений совершенно не учитывается влияние пульсаций плотности. Заметим, что если напряжения Рейнольдса $\overline{v_x'v_y'}$ и корреляции второго порядка $\overline{v_x'^2}$ и $\overline{v_y'^2}$ стремятся к нулю, то уравнения сводятся к соответствующей системе уравнений для ламинарных течений. Эти напряжения и корреляции являются величинами, характеризующими именно турбулентные течения. Определение этих величин с достаточной точностью представляет собой серьезную задачу при исследовании турбулентных течений.

Система уравнений решалась численно методом конечных разностей. Для этой цели область течения, занимаемая жидкостью, разбивалась разностной сеткой с шагом (i, j) , где i, j – индексы узлов сетки. В процессе вычислений изменялся размер шага $\Delta X, \Delta Y$.

В результате экспериментов получены значения температур на различной высоте от пола и от внутренних поверхностей ограждений при определенных параметрах внутреннего воздуха.

На основании полученных в результате эксперимента данных построены графические зависимости для относительных температур поверхностей при движении нагретого воздуха (рис. 3).

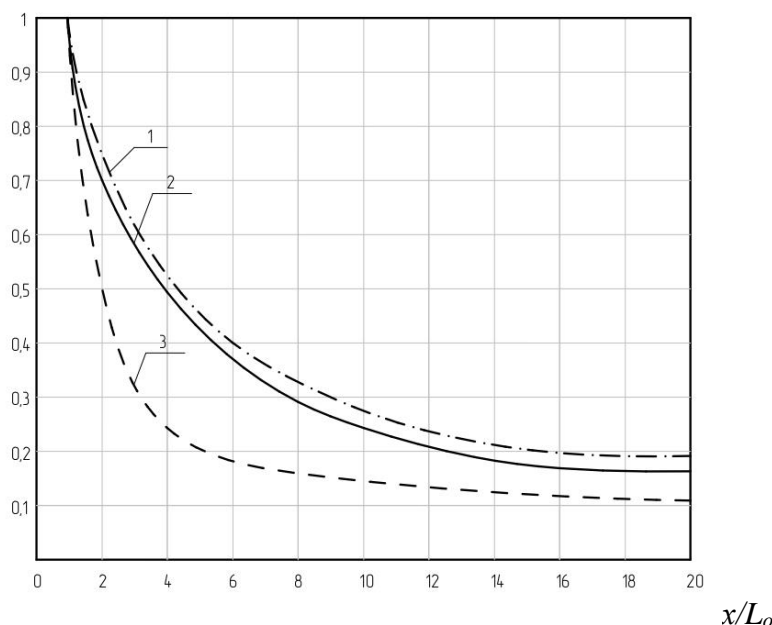

 $\Theta(x)$


Рис. 3. Распределение относительной температуры по высоте на адиабатной (значительной инерционности) стене над: 1 – регистром из гладких труб по расчетным данным; 2 – чугунным радиатором по расчетным данным; 3 – чугунным радиатором по экспериментальным данным

Как следует из рис. 3, температура адиабатической стенки резко убывает сразу же за точкой $x = L_0$, и затем ее зависимость от x переходит в менее сильную регулярную зависимость, которая аппроксимируется определенной степенной функцией.

В результате сравнительного анализа опытных данных по теплообмену с теоретическими результатами установлено, что расхождение составляет по температуре 5–15 %. Поэтому в целях сохранения памятников историко-культурного наследия принципиально важно, чтобы относительная влажность воздуха и температура объектов оставались более стационарными [11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – Москва : Мир, 1983. – 400 с. – Текст : непосредственный.
2. Кочев, А. Г. Особенности поддержания температурно-влажностного режима в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, Е. А. Кочева. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 4(48). – С. 48–52.
3. Stefan, W. Michalski. 1991 Paintings – Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock, and Vibration / Stefan W Michalski // Works of Art in Transit / editor M.F. Mecklenburg. – Washington DC : National Gallery. – 1991. – P. 223–248.
4. Кочев, А. Г. Исследование исторических систем по созданию и поддержанию микроклимата в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный



архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4 (60). – С. 96–100.

5. Кочев, А. Г. Определение температуры конвективных потоков у внутренних поверхностей ограждающих конструкций православных храмов / А. Г. Кочев, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь. – 2022. – № 25(77). – С. 243–249.

6. Кочев, А. Г. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов / А. Г. Кочев, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2012. – № 2. – С. 78–85.

7. Джалурия, Й. Свободно-конвективное течение, вызванное изолированным источником тепла на вертикальной поверхности / Й. Джалурия. – Текст : непосредственный // Труды американского общества инженеров-механиков. Серия С. Теплопередача. – 1982. – № 2. – С. 1–7.

8. Эккерт, Э. Р. Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк ; перевод с английского Э. М. Фурмановой [и др.] ; под редакцией акад. А. В. Лыкова. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 680 с. – Текст : непосредственный.

9. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 576 с. – ISBN 5-93972-015-2. – Текст : непосредственный.

10. Сибиси, Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы : перевод с английского / Т. Сибиси, П. Брэдшоу. – Москва : Мир, 1987. – 592 с. – Текст : непосредственный.

11. СП 391-1325800.2017. Храмы православные. Правила проектирования : введен 2018-06-23. – Москва : Минстрой России, 2018. – 54 с. – Текст : непосредственный.

KOCHEV *Aleksey Gennadevich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heat and gas supply; SOKOLOV* *Mikhail Mikhaylovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heat and gas supply; UVAROV* *Valeriy Aleksandrovich, postgraduate student of the chair of heat and gas supply*

CREATING TEMPERATURE CONDITIONS IN ORTHODOX CHURCHES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 433-45-35;
e-mail: unirs@nngasu.ru

Key words: Orthodox churches, temperature conditions, microclimate, thermal inertia, heat resistance, heating systems.

The article presents experimental data and theoretical results obtained from the equations and dependences of free convective heat transfer on the inner surface of the outer walls of Orthodox churches. The main types of heating systems for cathedrals and churches are considered.

REFERENCES

1. Bogoslovskiy V. N. Stroitel'naya teplofizika [Building thermal physics] / Moscow : Mir, 1983, 400 p.

2. Kochev A. G., Sokolov M. M., Kocheva E. A. Osobennosti podderzhaniya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima v pravoslavnykh khramakh [Specific features of maintaining temperature and humidity conditions in the Orthodox temples] / Privolzhskiy



nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2018. №4 (48). – P. 48–52.

3. Stefan W. Michalski. 1991 Paintings - Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock, and Vibration/ Works of Art in Transit, editor M. F. Mecklenburg. – Washington DC. – National Gallery. 1991. – P. 223–248.

4. Kochev A. G., Sokolov M. M. Issledovanie istoricheskikh sistem po sozdaniyu i podderzhaniyu mikroklimata v pravoslavnykh khramakh [Research of historical systems for creation and maintenance of microclimate in the Orthodox churches] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod, 2021. № 4 (60). – P. 96–100.

5. Kochev A. G., Sokolov M. M. Opredelenie temperatury konvektivnykh potokov u vnutrennikh poverkhnostey ograzhdayuschikh konstruksiy pravoslavnykh khramov [Determination of the temperature of convective flows at the internal surfaces of the enclosing structures of Orthodox churches] / Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost [Construction and industrial safety]. Simferopol. – 2022. № 25(77). – P. 243–249.

6. Kochev A. G., Sokolov M. M. Fiziko-matematicheskoe opisanie estestvennoy konveksii v pomeshcheniyakh pravoslavnykh khramov [Physical and mathematical description of natural convection in premises of Orthodox churches] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. – 2012. – № 2. – P.78–85.

7. Dzhaluraya Y. Svobodnokonvektivnoe techenie, vyzvanoe izolirovannym istochnikom tepla na vertikalnoy poverkhnosti [Free convective flow caused by an isolated heat source on a vertical surface] / Tr. amer. ob-va inzhenerov-mekh. Ser. S. Teploperedacha. – 1982. – № 2. – P. 1–7.

8. Ekkert E. R., Dreyk R. M. Teoriya teplo- i massoobmena [Theory of heat and mass transfer] / Per. s angl. E. M. Furmanovoy i dr.; pod red. akad. A. V. Lykova. – Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1961. – 680 p.

9. Prandtl L. Gidraeromekhanika [Hydroaeromechanics]. – Izhevsk : Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2000. – 576 p. – ISBN 5-93972-015-2.

10. Sibisi T., Bradshaw P. Konvektivny teploobmen. Fizicheskie osnovy i vychislitelnye metody [Physical foundations and computational methods]: Per. s angl. – Moscow : Mir, 1987. – 592 p.

11. SP 391-1325800.2017. Khramy pravoslavnye. Pravila proektirovaniya [Orthodox churches. Design rules] – Vved. 2018-06-23. – Moscow : Minstroy Rossii, 2018. – 54 p.

© А. Г. Кочев, М. М. Соколов, В. А. Уваров, 2023

Получено: 23.06.2023 г.