



УДК 697.1:726.5

Е. А. КОЧЕВА, ст. преподаватель кафедры теплогазоснабжения

ПОДВИЖНОСТЬ ВОЗДУХА В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, 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, подвижность воздуха, безынерционные поверхности, осушение ограждений, водяной пар, конвективные потоки.

Приводятся теоретические результаты и экспериментальные данные, полученные по уравнениям Навье-Стокса при движении воздуха у внутренних поверхностей осушаемых наружных стен православных храмов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на сохранность интерьера соборов и церквей.

Сохранность памятников архитектуры и культуры зависит от параметров наружного климата, от значений температуры, относительной влажности и скорости ветра, амплитуды и продолжительности их изменений [1]. Предметы интерьера православных храмов стареют при периодическом изменении внутренней температуры, подвижности внутренней среды и относительной влажности воздуха.

В регионах России с отрицательными температурами в холодный период года во время служб, когда в храм постоянно заходят и выходят люди, из-за проникновения холодного воздуха на некоторые поверхностях температура снижается ниже точки росы. Выделяющийся от лампад и свечей, от людей, от таяния снега с обуви водяной пар может сконденсироваться на росписях стен и иконах. В праздничные дни при горении большого количества лампад и свечей (рис. 1) происходит образование значительного количества водяного пара. При сгорании свечей выделяется 1,3 кг водяного пара на один 1 кг парафина [2].

Из-за непостоянства климатических условий в переходные и холодные периоды года восходящие конвективные потоки, взаимодействующие с поверхностями, имеют скорость движения воздуха на уровне выше 2,5 м в несколько раз ниже скорости нисходящих потоков у холодных безынерционных поверхностей, что нивелируется только наличием подоконников у оконных проемов [3, 4].

Излучение от отопительных приборов и нагретых поверхностей приводит к образованию рассредоточенных конвективных восходящих потоков внутри храма и исключает контакт внутреннего задымленного воздуха с росписями и иконами на наружных стенах. Восходящее движение воздуха в подклетах и молебном зале препятствует образованию застойных зон и влияет на воздухообмен в помещениях храма [4, 5].



Рис. 1. Особенность температурно-влажностного режима православных храмов

При рассмотрении условий осушения ограждающих конструкций с росписями трех православных храмов нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения скоростных полей восходящих потоков воздуха у внутренней поверхности наружных стен с большой инерционностью, образующихся над разными типами отопительных приборов. Основные закономерности и уравнения свободного конвективного движения потоков являются результатом теоретических положений, справедливых для идеальных условий [1, 6, 7, 8].

В реальных условиях помещения естественная конвекция отличается от свободного конвективного движения из-за ограниченного объема помещения, наличия нескольких разнонаправленных течений вдоль поверхностей. Особенно это заметно на уровне размещения открывающихся конструкций окон.

Для интенсивного осушения локальных мокрых пятен на поверхности стен с росписями в храме и подклете использовались тепловентиляторы (тепловые пушки) с регулируемой температурой, углом раскрытия и скоростью струи. Окончательная доосушка стен и поверхностей предметов осуществлялась конвективными струями от отопительных приборов. Подвижность воздуха в храмах при естественной конвекции в помещении связана с тем, что на интенсивность движения конвективного потока около поверхности влияет общая подвижность воздуха в помещении, а также применяемые типы отопительных приборов.

Неизотермичность поверхностей наружных ограждений помещений храма вызывает разные конвективные перемещения воздуха. Течения, развивающиеся только под действием выталкивающих сил, называются естественной или свободной конвекцией, в отличие от них вынужденная конвекция обусловлена главным образом давлением искусственного побудителя движения, но подвержена также влиянию выталкивающих сил [7, 9].

Основные уравнения, определяющие стационарное течение для жидкости с переменными свойствами принимают вид [10]:



$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0,$$

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = g\beta(t - t_a) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\rho c_p \left(V_x \frac{\partial t}{\partial x} + V_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = Q' + \beta T V_x \frac{\partial p_a}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right).$$

В процессе исследований были рассмотрены настилающиеся горизонтальные потоки от тепловентиляторов и пристеночные вертикальные конвективные струи, которые возникают вследствие нагрева поверхностей приборов отопления. 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.

Приведенные выше основные уравнения (1) были решены численно с помощью конечно-разностных методов. В процессе вычислений изменялся размер шага ΔX , ΔY .

Определяющие уравнения для турбулентных течений характеризуются в общем случае сильной нелинейностью. Для турбулентных течений справедливы те же уравнения сплошности, количества движения и энергии, которые описывают ламинарные течения. Единственное различие между соответствующими двумя системами уравнений заключается 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 при подстановке аппроксимирующих соотношений в уравнения сплошности, сохранения количества движения и энергии, описывающих ламинарное двумерное течение несжимаемой жидкости в режиме естественной конвекции (1) с учетом дифференцирования по времени, получаются следующие зависимости:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{DV_x}{D\tau} = \beta \cdot g \cdot (t - t_\infty) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla V_x) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{v_x'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v_x' v_y'}, \quad (2)$$

$$\frac{DV_y}{D\tau} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla V_y) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{v_x' v_y'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v_y'^2},$$

$$\frac{Dt}{D\tau} = \nabla \cdot (a \cdot \nabla t) - \frac{\partial}{\partial x} \overline{t' v_x'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{t' v_y'}.$$



Система уравнений (2) 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 результате экспериментов получены значения поля скоростей на различной высоте от пола и от внутренних поверхностей ограждений при определенных параметрах внутреннего воздуха подклета.

На основании полученных в результате расчета и эксперимента данных построены графические зависимости для максимальных значений скоростей нагретого воздуха при движении вдоль поверхностей (рис. 2).

$V_{\max}(x)$

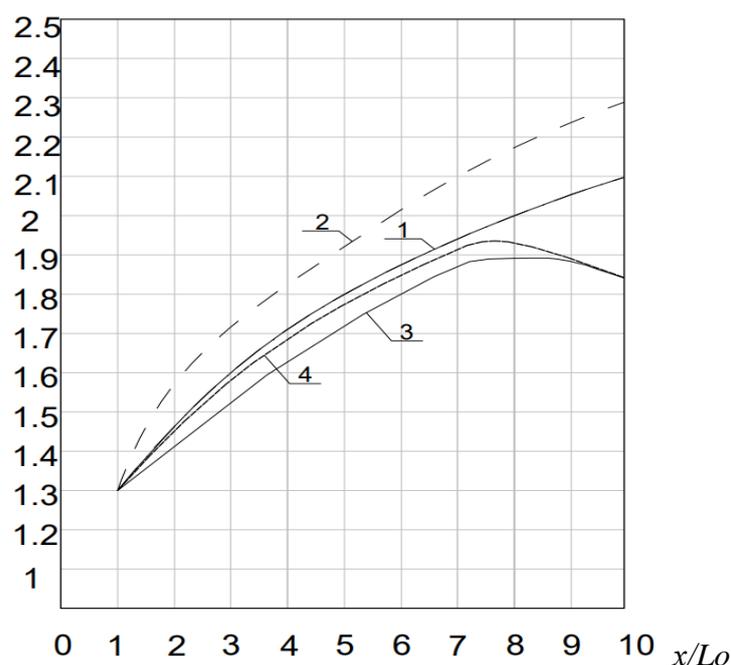


Рис. 2. Распределение максимальной скорости потока по высоте на адиабатной (значительной инерционности) стене над: 1 – чугунным радиатором по расчетным данным; 2 – регистром из гладких труб по расчетным данным; 3 – чугунным радиатором по экспериментальным данным; 4 – регистром из гладких труб по экспериментальным данным

Как следует из рис. 2, скорость потока по высоте вдоль адиабатической стенки плавно возрастает за точкой $x = L_0$ (L_0 – вертикальный размер отопительного прибора) и затем, выше 1 м, ее зависимость от x переходит в менее сильную регулярную зависимость, которая аппроксимируется определенной логарифмической функцией. Падение скорости в верхней части подклета происходит из-за наличия карниза и лепнины у начала арки свода.

В результате сравнительного анализа опытных данных по максимальным скоростям с теоретическими результатами установлено, что расхождение составляет 10–20 %. Поэтому в целях сохранения памятников историко-культурного наследия принципиально важно, чтобы подвижность воздуха в храме и подклете (как и относительная влажность воздуха с температурой) оставались более стационарными [11].



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – Москва : Мир, 1983. – 400 с. – Текст : непосредственный.
2. АВОК Стандарт–2–2004. Храмы православные : отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введен 2004-06-09. – Москва : НП АВОК, 2004. – 14 с. – ISBN 5-98267-004-9. – Текст : непосредственный.
3. 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 архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2018. – № 4 (48). – С. 48–52.
4. Особенности создания микроклимата в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, А. С. Сергиенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2016. – № 4. – С. 74–82.
5. Кочева, Е. А. Создание заданных микроклиматических условий в подклетах соборов и церквей / Е. А. Кочева. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность = Construction and industrial safety Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture. – Симферополь, 2022. – № 25 (77). – С. 250–254.
6. Кочев, А. Г. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов / А. Г. Кочев, М. М. Соколов. – Текст : непосредственный. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2012. – № 2. – С. 78–85.
7. Джалурия, Й. Свободно-конвективное течение, вызванное изолированным источником тепла на вертикальной поверхности / Й. Джалурия. – Текст : непосредственный // Теплопередача : труды американского общества инженеров-механиков. – 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 А. В. Лыкова. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 680 с. – Текст : непосредственный.
9. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск : Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с. – Текст : непосредственный.
10. Сибиси, Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы / Т. Сибиси, П. Брэдшоу ; перевод с английского С. С. Ченцова, В. А. Хохрякова ; под редакцией У. Г. Пирумова. – Москва : Мир, 1987. – 592 с. – Текст : непосредственный.
11. СП 391-1325800.2017. Храмы православные : свод правил : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 22 декабря 2017 г. N 1703/пр дата введения 23 июня 2018 г. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.10.2023). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. ВерсияПроф (ННГАСУ). – Текст : электронный.

KOCHEVA Elena Alekseevna, senior teacher of the chair of heat and gas supply

AIR MOBILITY IN ORTHODOX CHURCHES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: + 7 (831) 433-45-35;
e-mail: kochev.1961@mail.ru

Key words: Orthodox churches, air mobility, inertial surfaces, drying external walls, water vapor, convective flows.



The article presents theoretical results and experimental data obtained by the Navier-Stokes equations when air moves near the inner surfaces of the dried outer walls of Orthodox churches. The main factors affecting the safety of the interior of cathedrals and churches are considered.

REFERENCES

1. Bogoslovskiy V. N. *Stroitel'naya teplofizika* [Building thermal physics]. – Moscow : Mir, 1983. – 400 p.
2. AVOK Standart–2–2004. *Khramy pravoslavnye: otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha*. – Vved. 2004-06-09. – Moscow : AVOK, 2004. – 14 p. – ISBN 5-98267-004-9.
3. 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, NNGASU, 2018. № 4(48). – P. 48–52.
4. Kochev A. G., Sokolov M. M., Sergienko A. S., Moskaeva A. S., Kocheva E. A. *Osobennosti sozdaniya mikroklimata v pravoslavnykh khramah* / *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. Novosibirsk, 2016. № 4. – P. 74–82.
5. Kocheva E. A. *Sozdanie zadannykh mikroklimaticheskikh usloviy v podkletakh soborov i tserkvey* / *Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal po stroitelstvu i arkhitekture* [Construction and industrial safety. Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture]. Simferopol, 2022. № 25(77) – P. 250–254.
6. Kochev A. G., Sokolov M. M. *Fiziko-matematicheskoe opisaniye 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. NNGASU. – 2012. – № 2. – P. 78–85.
7. Dzhaluruya Y. *Svobodnokonvektivnoye techenie, vyzvannoye izolirovannym istochnikom tepla na vertikalnoy poverkhnosti* [Free convective flow caused by an isolated heat source on a vertical surface] / *Teploperedacha* [Heat transfer]. *Trudy amer. ob-va inzhenerov-mekh.* – 1982. – № 2. – P. 1–7.
8. Eckert E. R., Drake R. M. *Teoriya teplo- i massoobmena* [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. *Gidroaeromekhanika* [Hydroaeromechanics]. – Izhevsk : NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000, 576 p.
10. Cebeci T., Bradshaw P. *Konvektivnyy teploobmen. Fizicheskie osnovy i vychislitelnye metody* [Physical foundations and computational methods]: Tr. from eng. S. S. Chentsova, V.A. Khokhryakova ; pod red. U. G. Pirumova. – Moscow : Mir, 1987. – 592 p.
11. SP 391-1325800.2017. *Khramy pravoslavnye* [Orthodox churches] ; svod pravil : utver. Prikazom Min-va stroitelstva i zhilishchno-kommun. khoz-va RF ot 22 dekabrya 2017 g. N 1703/pr : data vved. 23 iyunya 2018 g. – URL: <http://www.consultant.ru> (data obrascheniya: 30.10.2023). – Rezhim dostupa: KonsultantPlyus. Zakonodatelstvo. VersiyaProf (NNGASU).

© **Е. А. Кочева, 2023**

Получено: 10.10.2023 г.