



# Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме

**К. В. Беляев**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [kira@cfд.spbstu.ru](mailto:kira@cfд.spbstu.ru)

**А. В. Гарбарук**, канд. физ.-мат. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [agarbaruk@cfд.spbstu.ru](mailto:agarbaruk@cfд.spbstu.ru)

**Д. А. Никулин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [dan@cfд.spbstu.ru](mailto:dan@cfд.spbstu.ru)

**М. Х. Стрелец**, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лаб., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [strelets@cfд.spbstu.ru](mailto:strelets@cfд.spbstu.ru)

**Ключевые слова:** вентиляция, микроклимат, численное моделирование, вычислительная гидродинамика, православный храм, система ОВК

## Введение

Строительство православных храмов в России имеет богатые традиции. В советский период строительство православных храмов практически прекратилось и возобновилось только в начале XXI века; в это же время были созданы новые, научно обоснованные правила и пособия по их проектированию [5, 6]. Одна из важных задач, решаемых на этапе проектирования или реставрации религиозных зданий, – создание в них оптимальных параметров микроклимата с целью обеспечить как комфортные условия для посетителей и служителей храмов, так

и сохранность религиозного и художественного интерьера [1].

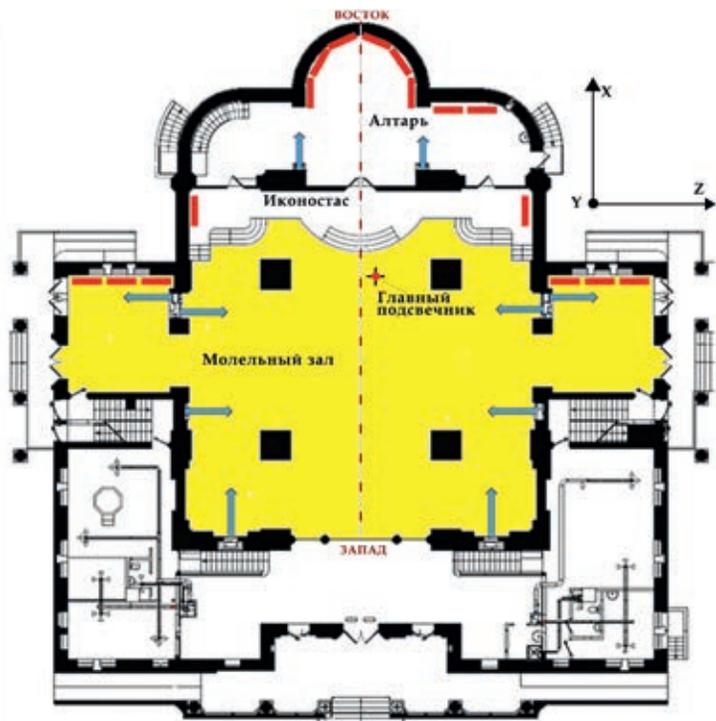
Важной специфической особенностью эксплуатации зданий православных храмов является традиция возжигания в них церковных свечей. В тех случаях, когда имеется высокая подвижность воздуха в месте размещения свечей, их горение сопровождается интенсивным выделением сажи, которая в виде отложений черного цвета покрывает значительные по площади поверхности художественного и религиозного интерьера, а также архитектурные элементы здания. Кроме того, сажа адсорбируется поверхностью, на которую она осаждается, и глубоко

проникает в наружный слой. Эту сажу невозможно удалить при помощи щетки или стереть, поэтому стены обычно моются щелочными растворами с последующей покраской. Чем больше помещение храма, тем труднее и дороже проводить в нем подобные ремонтно-восстановительные работы (подробнее об указанной проблеме см. работу [3]).

Как правило, при проектировании зданий новых православных храмов расчет теплового баланса и систем жизнеобеспечения проводится в предположении однородности среды в объеме помещения. Данный подход оправдан в случае типовых помещений сравнительно небольшого объема и, очевидно, недостаточно обоснован для больших сооружений, в частности православных храмов, архитектура которых подразумевает доминирующую вертикальную планировку, способствующую возникновению значительной стратификации параметров микроклимата по высоте. Ошибки проектирования в этом случае могут приводить к появлению различного рода проблем, которые выявляются, как правило, только на этапе эксплуатации здания.

Приведем несколько примеров такого рода случаев, непосредственно связанных с темой настоящей статьи. В конце 70-х годов прошлого века в качестве основной системы отопления в частных домах стали использовать систему «теплый пол». Степень теплового комфорта, «невидимость» и отсутствие шума при эксплуатации способствовали ее широкому внедрению в строительную практику. Однако ее применение для обогрева больших по объему монументальных соборов и храмов привело к неоднозначным, в т. ч. отрицательным результатам. Так, например, в старинной церкви Св. Мартина (г. Верте, Нидерланды) после замены системы тепловоздушного отопления на систему «теплый пол» существенно увеличилась степень осаждения сажи на стены, иконы и старинные витражи [9]. За два года многочисленных экспериментальных исследований была обнаружена однозначная зависимость степени загрязнения поверхностей интерьера от подвижности воздуха вблизи пола, которая определялась величиной разницы температуры воздуха и пола и вызывала интенсивное сажеобразование при горении церковных свечей. Итогом этой работы стало внедрение в церкви системы, которая поддерживает минимальную разницу температуры пола и воздуха, использование преимущественно высококачественных восковых свечей и защита старинного интерьера при помощи стеклянных витрин.

В г. Магнитогорске (Челябинская обл.) в 2004 году был открыт кафедральный собор Вознесения



■ Рис. 1. План храма Рождества Христова. Желтым цветом обозначена часть пола, обогреваемая системой «теплый пол», прямоугольники красного цвета – радиаторы водяного отопления, стрелки голубого цвета – направления движения воздуха на решетках вентиляционных каналов системы тепловоздушного отопления. Пунктир – YX-сечение «восток–запад»

Христова – самое большое культовое сооружение города. К сожалению, в настоящее время внутреннее убранство собора потеряло свою первозданную красоту из-за того, что поверхности стен, потолка и куполов покрылись значительным слоем сажи. В работе [7] представлены результаты расчетно-теоретических исследований с анализом причин неудовлетворительного состояния художественного интерьера собора и рекомендациями по созданию оптимальной системы тепловоздушного отопления. В частности, предложено защитить от налипания сажи поверхность стен и колонн пристенными потоками путем организации подачи воздуха вертикальными струями от напольных распределителей, а удаления – через вентиляционные проемы, расположенные в окнах подкупольного барабана.

Аналогичная ситуация возникла в храме Рождества Христова в Санкт-Петербурге на Пискаревском проспекте. Это самый большой храм, построенный в городе за последние 100 лет (открылся в 2018 году), и практически сразу после начала его эксплуатации были выявлены серьезные проблемы в работе систем ОВК. В частности, как показали многочисленные наблюдения, в помещении храма в пространстве у пола молельного зала возникают интенсивные воздушные потоки, вызывающие тепловой дискомфорт у находящихся там людей. Кроме

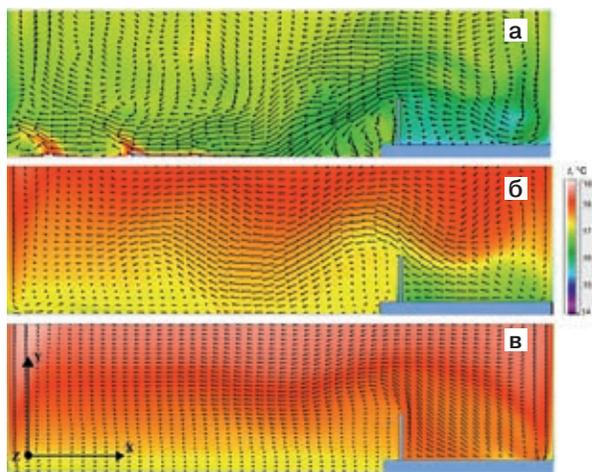


Рис. 2. Мгновенные поля температуры и векторы скорости в плоскости симметрии здания (сечение «восток–запад», см. рис. 1): а – проектная система ОВК; б – проектная система с отключенным «теплым полом»; в – предлагаемая система

того, под воздействием этих воздушных потоков пламя церковных свечей интенсивно колеблется, что, в свою очередь, приводит к значительному выделению копоти. В таких условиях проведение дорогостоящей, трудоемкой художественной росписи стен храма, высота которого составляет 50 м, целесообразно только после ликвидации причин сажеобразования.

Цель настоящей статьи – используя методы вычислительной гидродинамики (ВГ), выявить причины неудовлетворительной работы проектной системы ОВК храма Рождества Христова и предложить ее модификацию, которая бы обеспечивала нахождение значений показателей комфортности в нормативном диапазоне, а также низкую подвижность воздуха у пола молельного зала и, как следствие, снижение выделения копоти при горении свечей.

## Метод решения

Представленные расчетно-теоретические исследования базируются на использовании методов ВГ. Этот подход требует ограниченной эмпирической информации и позволяет рассчитывать как интегральные, так и локальные характеристики воздушных потоков в объеме помещения. Последнее важно в случае анализа работы систем ОВК уникальных зданий и объектов (см., например, [4]) и незаменимо в контексте настоящего исследования. Практическая реализация подхода проводится на базе использования программного комплекса COOLIT [8].

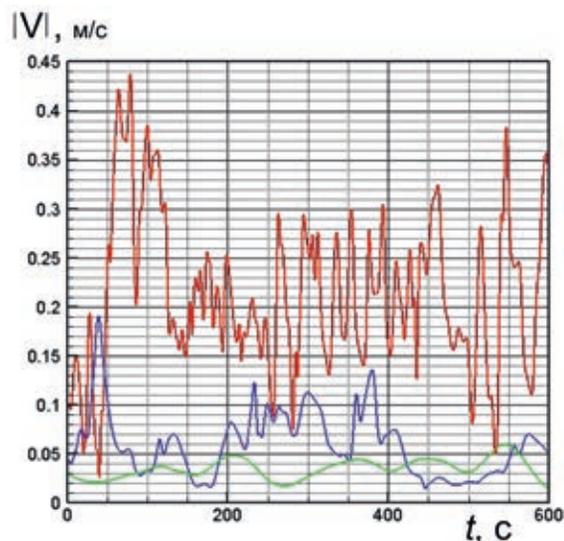


Рис. 3. Зависимость от времени величины модуля скорости воздушного потока в точке размещения главного подсвечника. Линия красного цвета – проектная система ОВК, синего – проектная система с отключенным «теплым полом», зеленого – предлагаемая система

## Объект исследования

Храм Рождества Христова – одиноко стоящий купольный храм. Его высота – 50 м, вместимость – 1000 человек, площадь молельного зала – 400 м<sup>2</sup>.

Проектная система ОВК храма состоит из трех систем: «теплый пол», радиаторное отопление и тепловоздушное отопление (рис. 1). Забор воздуха из помещения храма происходит через вентиляционную решетку, расположенную на западной стене на высоте 20 м над уровнем пола.

## Результаты и обсуждение

Как показали расчеты, при работе проектной системы ОВК движение воздуха у пола молельного зала является нестационарным и характеризуется наличием многочисленных вихревых структур (рис. 2а), формирующихся в результате взаимодействия следующих течений:

- опускные течения около относительно холодных поверхностей архитектурных элементов храма;
- поток относительно холодного воздуха из алтарной части помещения, перетекающий через иконостас и попадающий в молельный зал;
- вихревые ячейки над нагретым полом молельного зала (конвекция Рэлея–Бенара).

На рис. 3 (линия красного цвета) представлен график изменения во времени модуля скорости воздушного потока в точке, где находится главный подсвечник храма (см. рис. 1). Амплитуда изменений скорости потока во времени достаточно велика – от 0,03 до 0,44 м/с. Частота колебаний меняется во

времени и составляет от 3 до 6 колебаний в минуту, из-за чего пламя свечей также является нестационарным и колеблется с близкой частотой.

Видеосъемка горения свечей в молельном зале позволила рассчитать долю времени от общего времени горения, когда пламя свечей остается вертикальным и они практически не коптят ( $\tau = 11\%$ ). Очевидно, что точность этих наблюдений невысока, однако качественно они соответствуют результатам расчетов и подтверждают связь между колебаниями скорости и характером горения свечей.

Для оценки степени влияния конвекции Рэлея-Бенара на течение воздуха у пола молельного зала был проведен расчет параметров микроклимата в помещении храма при отключенной системе «теплый пол». В этом случае происходит радикальное изменение характера течения в рассматриваемой зоне. В частности, исчезают вихревые структуры, поле температуры становится более однородным (рис. 2б), существенно уменьшается частота колебаний модуля скорости (рис. 3, синяя линия) и его среднее значение (с 0,21 до 0,06 м/с). Результаты расчета подтверждаются наблюдениями за характером горения свечей. В рассматриваемом случае время горения свечей без образования копоти составляет  $\tau = 52\%$ .

Независимо от того, работает или нет система «теплый пол», в центральной части молельного зала существует устойчивое перемещение относительно холодных воздушных масс по направлению от иконостаса к западной стене храма (рис. 2а, 2б). Об этом также свидетельствуют наблюдения за пламенем свечей, которое преимущественно отклоняется в направлении западной стены храма. Очевидно, что необходимо найти инженерное решение, позволяющее исключить перемещение холодного воздуха из алтарной зоны в молельный зал. Из всех рассмотренных вариантов наиболее эффективным оказался вариант с отбором воздуха в полу из алтарной части помещения храма. На рис. 2в представлены результаты расчета такого варианта при отключенной системе «теплый пол». В рассматриваемом случае перетекание воздуха из алтарной части помещения в молельный зал практически отсутствует, что приводит к уменьшению подвижности воздуха у пола в молельном зале (рис. 3, линия зеленого цвета). По сравнению с проектной системой ОВК не только значительно (в 6,2 раза) уменьшается среднее значение модуля скорости – с 0,21 до 0,034 м/с, – но также существенно снижается частота его колебаний, что, очевидно, должно приводить к дополнительной стабилизации пламени свечей.



## Видит всё Думает за вас

Новый тепловизор testo 883  
Разработан специально для профессионалов в области энергоаудита зданий и превентивной диагностики

- **Лучшее качество изображения:** разрешение 320x240 пикселей (640x480 пикселей с функцией SuperResolution)
- **Автоматическое управление термограммами:** привязка изображения к правильному объекту измерения
- **Профессиональное документирование:** быстрое создание отчетов, профессиональное ПО
- Приложение **testo Thermography App**
- Внесен в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений

Таблица 1

Результаты расчетов осредненных по площади зала значений процента недовольных тепловыми условиями (*PPD*) и наличием сквозняков (*DR*), а также доля времени горения церковных свечей  $\tau$  без образования копоти, полученная из обработки видеоданных, для различных вариантов систем ОВК

Система ОВК	Посетители, недовольные тепловыми условиями, <i>PPD</i> , %	Посетители, недовольные наличием сквозняков, <i>DR</i> , %	Время горения свечей без образования копоти, $\tau$ , %
Проектная система	15,8	13,2	11
Проектная система, «теплый пол» отключен	12,9	4,5	52
Предлагаемая система	8,4	1,3	97

В табл. 1 представлены результаты расчета процента посетителей, недовольных тепловыми условиями (*PPD*) и наличием сквозняков (*DR*, подробнее о расчете показателей комфортности см. [2]), а также доля времени горения свечей без образования копоти, полученная из обработки видеоматериалов. По сравнению с проектной ОВК процент недовольных сквозняком уменьшился практически на порядок, а процент недовольных тепловым комфортом снизился почти в два раза и попал в рекомендованный диапазон <10 %.

Итогом работы стали предложения по модификации проектной системы ОВК, которые заключались в отказе от системы «теплый пол» и организации забора воздуха в полу алтарной части. Эти предложения послужили основой для разработки технического задания на проектирование новой системы ОВК храма. В 2020 году был проведен монтаж и пусконаладочные работы новой системы. Опыт ее эксплуатации в осенне-зимний период 2020–2021 годов показал, что характеристики воздушной среды у пола молельного зала соответствуют расчетным данным. Исчезли сквозняки и, как следствие, при горении свечей практически не образуется сажа (см. табл. 1).

## Заключение

Выполнена серия расчетов динамических характеристик воздушных потоков и параметров микроклимата в помещении храма Рождества Христова на Пискаревском проспекте в Санкт-Петербурге.

Анализ полученных результатов показал, что:

- при проектировании систем ОВК больших храмов необходимо обеспечить низкую подвижность воздушных потоков в молельном зале. Для решения этой задачи следует использовать подходы, основанные на методах ВГ;
- использование системы «теплый пол» может приводить к снижению качества микроклимата в молельном зале;
- в осенне-зимний период в алтарной части храма за счет опускных течений возможно накопление значительных объемов холодного

воздуха, перемещение которых в молельный зал приводит к снижению там качества микроклимата.

## Литература

1. Бродач М. М. Отопление соборов – практика альтернативных решений // АВОК. – 2004. – № 2.
2. ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. – М.: Стандартинформ, 2011.
3. Девина Р. А., Илларионова И. В. и др. Микроклимат церковных зданий (основы нормализации температурно-влажностного режима). – М.: РИО ГосНИИР, 2000.
4. Никулин Д. А., Стрелец М. Х., Чумаков Ю. С. Результаты компьютерного моделирования аэродинамики и температурного состояния интерьера Исаакиевского собора // Кафедра IV. Материалы научно-практической конференции «Исаакиевский собор между прошлым и будущим». – СПб., 2008. – С. 404–424.
5. СП 391.1325800.2017 Храмы православные. Правила проектирования. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – М.: Стандартинформ, 2018.
6. Стандарт АВОК-2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004.
7. Старкова Л. Г., Мореева Ю. А., Новоселова Ю. Н. Оптимизация микроклимата в православном храме методом числового моделирования воздушных потоков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – № 18(3). – С. 53–59.
8. Daat Research Corp. Attn: Human Resources. – P.O. Box 5484. Hanover, NH 03755-5484 USA. – URL: <https://daat.com>.
9. Schellen H. L. Heating monumental churches: Indoor climate and preservation of cultural heritage. – Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – DOI:10.6100/IR561673.