

Моделирование процессов воздухораспределения и теплопереноса в Исаакиевском соборе с использованием методов вычислительной аэродинамики: оценка и рекомендации по совершенствованию системы отопления, вентиляции и кондиционирования

Беляев К.В.¹, Никулин Д.А.^{1,*}, Стрелец М.Х.¹, Чумаков Ю.С.¹

¹«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

* +7-921-9482482, +7-911-7214541, dan@cfд.spbstu.ru

(Данная работа обобщает результаты численных исследований аэродинамики и процессов теплопереноса в помещении Исаакиевского собора, проводившихся в течение 2006–2008гг. в рамках договора между ГУК «Государственный музей–памятник «Исаакиевский собор» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»)

1. Введение

Исаакиевский собор в Санкт-Петербурге является четвёртым по величине купольным храмом в мире (высота здания составляет 101.5 м., длина – 111.3 м., ширина – 97.6 м., наружный диаметр центрального купола – 25.8 м.). Помимо архитектурной уникальности, собор известен многочисленными живописными и мозаичными картинами на его стенах и сводах, авторами которых являются выдающиеся российские художники. Однако к началу XXI века многие из элементов внутреннего убранства собора утратили свой первоначальный вид, что в значительной степени было обусловлено использованием устаревшей системы теплоснабжения и вентиляции собора, не обеспечивающей выполнения современных жёстких требований к микроклимату в музеях–памятниках такого типа. В связи с этим, в 2006 г. руководством СПб ГБУК «ГМП «Исаакиевский собор» было принято решение о её модернизации.

Основная цель модернизации системы теплоснабжения – обеспечить нахождение температуры поверхности художественного интерьера собора в рекомендованном нормативными документами диапазоне значений $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В силу уникального статуса Исаакиевского собора исключается любая возможность установки элементов системы теплоснабжения внутри его помещения или изменение в нём мест подачи воздуха (вентиляционные решётки и душики) которые были предусмотрены во время строительства собора. Таким образом, остаётся практически единственный путь решения поставленной задачи, основанный на определении необходимого диапазона значений параметров новой системы теплоснабжения (тепловоздушных установок, ТУ) и разработке соответствующей стратегии её функционирования.

Работа проводилась при использовании современных методов вычислительной аэродинамики (Computational Fluid Dynamics (CFD) в англоязычной литературе). В отличие от относительно простых инженерных подходов, широко используемых при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) в типовых зданиях (см., например, [1, 2]), методы CFD используют минимальный объем эмпирической информации и позволяют с достаточно высокой точностью предсказать локальные параметры воздушных потоков и полей температуры, как в свободном объёме помещения, так и на его внутренних поверхностях. Что является важным преимуществом этого подхода, учитывая цели рассматриваемой работы.

В связи с тем, что применение методов CFD требует больших вычислительных ресурсов, их практическое использование при разработке и проектировании систем ОВК (отопление, вентиляция, кондиционирование) началось сравнительно недавно. Тем не менее, благодаря быстрому развитию компьютерной техники и вычислительных технологий, наблюдаемому в течение последних десятилетий, число базирующихся на этих методах исследований применительно к ОВК нестандартных технических и архитектурных объектов, в том числе, памятников культурно-исторического наследия быстро возрастает (см., например, работы [3–7] и обзор [8]). В результате, в этом направлении имеется значительный прогресс. Следует, однако, отметить, что каждый из уникальных архитектурных объектов характеризуется своими специфическими особенностями, которые необходимо учитывать при выборе соответствующей математической модели.

Данная статья организована следующим образом. В разделе 2 кратко представлена математическая модель, используемая для описания процессов конвективного и кондуктивного теплопереноса в программном комплексе COOLIT® [9], с помощью которого проводились численные исследования в работе. Этот комплекс, разработанный компанией DAAT Research Corp. (USA) при участии сотрудников лаборатории «Вычислительная гидроакустика и турбулентность» политехнического университета, предназначен, в первую очередь, для решения задач об охлаждении электронных приборов. Однако реализованная в нём математическая модель и графические препроцессор и постпроцессор являются вполне подходящими для решения задач ОВК. Раздел 3 посвящён оценке точности используемой модели путём сопоставления результатов, полученных с её помощью с результатами измерений, выполненных в Исаакиевском соборе в рамках проекта. Наконец, в разделе 4 обсуждаются результаты численных исследований, направленных на установление

причин неудовлетворительной работы существующей системы ОВК собора и на оценку эффективности различных путей её усовершенствования. В заключении кратко формулируются основные результаты работы.

2. Математическая модель

Математическая модель, реализованная в COOLIT[®], представляет собой комплекс отдельных моделей, включающий модель для описания конвективного переноса импульса и энергии в турбулентных дозвуковых неизотермических потоках и ряд моделей для описания кондуктивного теплопереноса в твёрдых телах и в пористых средах. В данном разделе приводится краткое описание этих моделей.

2.1. Математическая модель аэродинамики и теплопереноса в свободном воздушном пространстве внутри и вне собора

Для описания турбулентных воздушных потоков в COOLIT[®] используются осреднённые по Фавру уравнения Навье-Стокса для сжимаемого газа в гипозвуковом приближении [10]. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\rho \vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \nabla \tilde{p} - \nabla \cdot \hat{\tau}_e - (\rho - \rho_{ref}) \vec{g} = 0, \quad (2)$$

$$C_p \left[\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} T) \right] + \nabla \cdot \vec{q}_e - Q = 0, \quad (3)$$

$$\rho = p_{ref} m / RT, \quad (4)$$

При записи (1)-(4) введены следующие обозначения: t - время, \vec{V} - вектор скорости, $\tilde{p} = p - p_{ref}$ - динамическое (избыточное) давление, определяемое как разность локального статического давления и его значения на уровне земной поверхности (p_{ref}), ρ - плотность, T - температура, C_p - удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении (предполагается, что она не зависит от температуры), \vec{g} - вектор ускорения силы тяжести, Q - плотность объёмного тепловыделения, m - молекулярная масса воздуха, R - универсальная газовая постоянная, а ρ_{ref} - характерный уровень плотности, определяемый по p_{ref} и температуре воздуха в окружающей атмосфере T_{ref} ($\rho_{ref} = p_{ref} m / RT_{ref}$).

Отметим, что в отличие от наиболее популярной формы уравнений смешанной конвекции в приближении Буссинеска, её гипозвуковая форма (1)-(4) справедлива при расчёте течений с сильной температурной неоднородностью, что является важным для рассматриваемой задачи, поскольку температура наружного воздуха в зимнее время значительно отличается от температуры в помещении. В то же время при использовании этой формы не возникает вычислительных трудностей, связанных с численным решением полных уравнений для сжимаемого газа при характерных для вентиляционных течений малых числах Маха.

Эффективный тензор напряжений $\hat{\tau}_e$ и вектор плотности теплового потока \vec{q}_e , входящие в уравнения (2), (3), определяются соотношениями:

$$\hat{\tau}_e = 2\mu_e \left[\hat{S} - \left(\frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \hat{E} \right], \quad \text{где } \hat{S} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), \quad \vec{q}_e = -\lambda_e \nabla T, \quad (5)$$

которые базируются на гипотезе Буссинеска об их линейной связи с тензором скоростей деформаций \hat{S} и градиентом температуры соответственно.

Эффективные коэффициенты вязкости μ_e и теплопроводности λ_e , входящие в (5), представляют собой сумму соответствующих молекулярных коэффициентов и их турбулентных аналогов μ_t и теплопроводности λ_t :

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \quad \lambda_e = \lambda + \lambda_t. \quad (6)$$

Молекулярные коэффициенты переноса в (6) рассчитываются по формулам кинетической теории газов, а турбулентная вязкость находится из решения уравнения переноса однопараметрической дифференциальной модели турбулентности v_t -92 [11]:

$$\frac{\partial \rho v_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} v_t) - \nabla \cdot [\rho (v + C_0 v_t) \nabla v_t] = \rho S_{v_t}, \quad (7)$$

где

$$S_{v_t} = -\frac{1}{\rho} \nabla \rho [v + (C_0 - C_1) v_t] \cdot \nabla v_t + C_2 F_2 \left\{ v_t \Gamma_1 + A_1 v_t^{4/3} \Gamma_2^{2/3} + A_2 [(v + v_t) \Gamma_1]^{1/2} N_1 \right\} + C_3 v_t (\Delta v_t + N_2) - C_4 v_t (\nabla \cdot \langle \vec{V} \rangle + |\nabla \cdot \langle \vec{V} \rangle|) - \frac{C_6 v_t (N_1 d_w + (v_t)_w) + C_7 F_1 v v_t}{d^2}. \quad (8)$$

Здесь \vec{V} - средняя скорость по Фавру, $\langle \vec{V} \rangle$ - средняя скорость по Рейнольдсу, ν - молекулярная кинематическая вязкость, d - минимальное расстояние от рассматриваемой точки потока до твёрдой стенки, модифицированное с учётом шероховатости поверхности, $d = d_w + 0.01 k_s$ (d_w - минимальное расстояние до стенки, k_s - высота элемента шероховатости), $(v_t)_w$ - значение турбулентной вязкости на стенке (на гладкой поверхности оно равно нулю, а на шероховатой рассчитывается по формулам $(v_t)_w = 0.02 v^* k_s$, $v^* = (\tau_w / \rho)^{1/2}$).

Член, содержащий $\langle \vec{V} \rangle$ в (8) введён для более точного учёта влияния на турбулентность сил плавучести, что, очевидно, является весьма важным для смешанно-конвективных течений, возникающих в свободном объёме помещения собора. Для определения дивергенции вектора $\langle \vec{V} \rangle$ используется следующее соотношение, основанное на связи скоростей, осреднённых по Фавру и Рейнольдсу:

$$\nabla \cdot \langle \vec{V} \rangle \cong \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot \left(\frac{v_t}{\rho \sigma_t} \nabla \rho \right). \quad (9)$$

Функции F_1 , F_2 , Γ_1 и Γ_2 , входящие в (8), определяются следующим образом:

$$F_1 = \frac{N_1 d + 0.4 C_8 v}{v_t + C_8 v + v_w}, F_2 = \frac{\tilde{v}(\tilde{v} + 1.3) + 0.2}{\tilde{v}(\tilde{v} - 1.3) + 1}, \tilde{v} = \frac{v_t}{7\nu}, \quad (10)$$

$$\Gamma_1 = \left(2 \hat{S} : \hat{S} \right)^{1/2}, \Gamma_2 = \left(\Delta \vec{V} \cdot \Delta \vec{V} \right)^{1/2},$$

где

$$N_1 = (\nabla v_t \cdot \nabla v_t)^{1/2}, \quad N_2 = (\nabla N_1 \cdot \nabla N_1)^{1/2}. \quad (11)$$

Эмпирические константы модели равны:

$$A_1 = -0.5, A_2 = 4.0, C_0 = 0.8, C_1 = 1.6, C_2 = 0.1, C_3 = 4.0, C_4 = 0.35, C_6 = 2.9, C_7 = 31.5, C_8 = 0.1. \quad (12)$$

Наконец, для определения турбулентной теплопроводности используется аналогия Рейнольдса, согласно которой $\lambda_t = c_p \mu / \sigma_t$, где турбулентный аналог числа Прандтля σ_t равен 0.9.

Выбор именно этой модели продиктован тем, что, наряду с вычислительной эффективностью, она обеспечивает приемлемую точность расчёта вентиляционных потоков, для которых характерно наличие присоединённых пограничных слоёв, струйных и отрывных течений и значительное влияние эффектов плавучести (см., например, [12–14]).

2.2. Математическое моделирование здания и элементов интерьера Исаакиевского собора

Здание Исаакиевского собора имеет исключительно сложную форму, а его интерьер содержит совокупность большого числа самых разнообразных объектов с различными теплофизическими свойствами и геометрией. Примерами этих объектов служат стены собора, колонны, детали декора интерьера, оконные и дверные проёмы, осветительные приборы.

Для геометрического моделирования всех этих и ряда других объектов в COOLIT® имеется специализированный препроцессор, содержащий следующую библиотеку «элементарных» объектов:

- трёхмерное твёрдое тело;
- плоское твёрдое тело (непроницаемое тело, размер которого в одном из пространственных направлений много меньше, чем в двух других);
- трёхмерное пористое тело;
- плоское пористое тело (проницаемое тело, размер которого в одном из пространственных направлений много меньше, чем в двух других);

При геометрическом моделировании здания Исаакиевского собора и его объектов интерьера предполагалось, что они могут приближённо рассматриваться как совокупность прямоугольных параллелепипедов, расположенных относительно друга таким образом, что их приближенное описание возможно на единой декартовой сетке. При этом элементарные объекты использовались следующим образом.

С помощью объекта «трёхмерное твёрдое тело» моделировались внутренние и внешние стены собора, колонны, потолочные перекрытия, элементы купола, ворот, дверей и т. д. Для описания теплопереноса внутри твёрдых тел и их теплообмена с окружающей воздушной средой в COOLIT используются уравнение теплопроводности с распределёнными источниками тепла. Это уравнение решается совместно с уравнением переноса энергии в свободном объёме (3) и/или с уравнениями теплопереноса в других объектах, с которыми соприкасается рассматриваемое твёрдое тело, в сопряжённой постановке (с использованием условий непрерывности температуры и теплового потока).

Объект «плоское твёрдое тело» использовался для геометрического моделирования стен киосков для продажи сувениров, помещения для экскурсоводов, а также стендов у северных и южных ворот и фальшь-стены у западной стены собора. Для математического описания процессов теплопереноса через плоские твёрдые тела используется уравнение теплопроводности, упрощённое с использованием предположения о локально одномерном и квазистационарном характере распределения температуры по поверхности такого тела.

Объект «трёхмерное пористое тело» предназначен для моделирования сложных реальных объектов, представляющих собой совокупность близко расположенных мелких объектов, которую можно приближённо рассматривать как однородную пористую среду. При создании компьютерной модели Исаакиевского собора этот объект использовался для приближенного представления осветительных люстр, а также ворот и ограждения алтаря. Для описания гидродинамики и процессов теплопереноса в пористых телах используются так называемые уравнения однотемпературной фильтрации. В рамках этой модели предполагается, что теплообмен между газом и пористым скелетом является идеальным (температура газа внутри пор равна температуре пористого «скелета»). Уравнения фильтрации решаются совместно с уравнениями переноса массы, импульса и энергии в свободном воздушном пространстве собора в сопряжённой постановке.

По аналогии с моделью плоского твёрдого тела, модель плоского пористого тела выводится из соответствующей модели трёхмерного пористого тела в предположении, что процессы переноса импульса, массы и энергии через него являются локально одномерными и квазистационарными. Как и для всех других объектов, эти уравнения решаются совместно с уравнениями переноса массы, импульса и энергии в воздухе в сопряжённой постановке. При моделировании собора этот объект использовался для описания иконостаса.

Компьютерная модель Исаакиевского собора, созданная с использованием описанных элементарных объектов на основе имеющихся CAD моделей, представлена на рис. 1–3, которые дают представление о детальности геометрического моделирования.

На рис. 1 показана копия экрана с внешним видом этой модели.

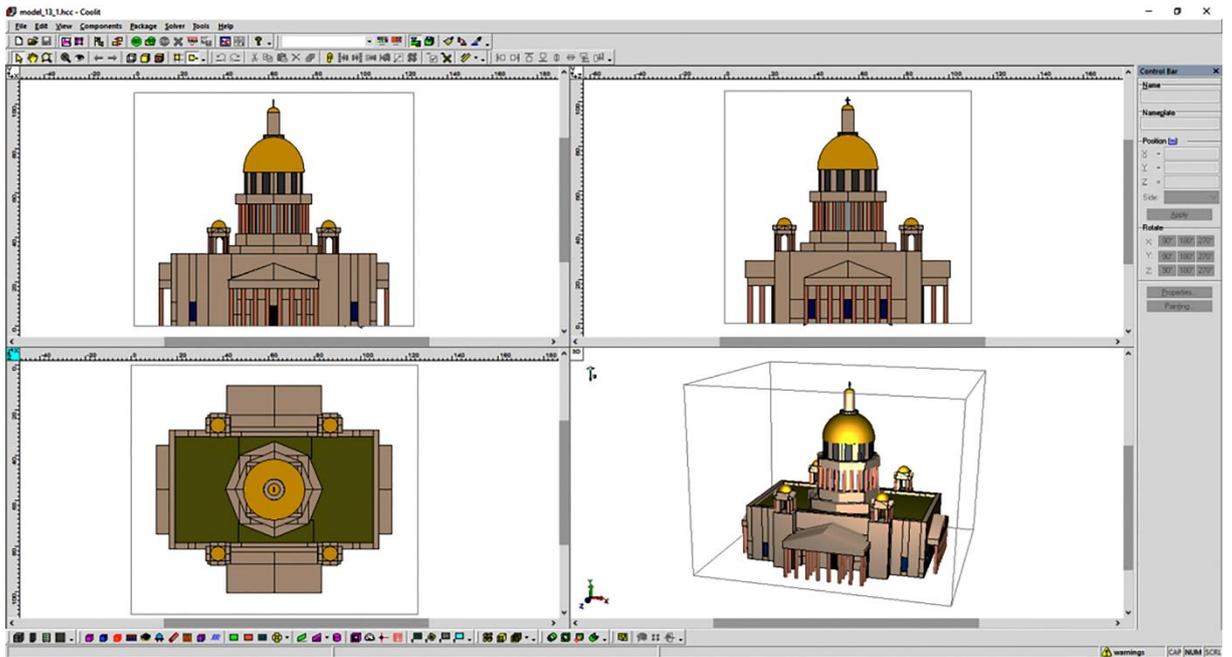


Рисунок 1. Компьютерная модель Исаакиевского собора, созданная при помощи графического препроцессора COOLIT.

Ось OZ показанная в левом нижнем углу 3D окна и левом верхнем углу каждого 2D окна декартовой системы координат ориентирована на местность по направлению юг-север (стрелка оси направлена на север), ось OX - по направлению восток-запад (стрелка оси направлена на запад), ось OY направлена вверх (против вектора ускорения свободного падения). Таким образом, в левом нижнем 2D окне представлен вид собора сверху, в левом верхнем - его северный фасад, а в правом верхнем - восточный фасад. Черными линиями показаны границы расчётной области, которая расположена в окружающем собор воздушном пространстве и имеет форму прямоугольного параллелепипеда с гранями, совпадающими с плоскостями XY, XZ и YZ. Размеры этой области составляют 125 м по оси OX, 105 м по оси OY и 110 м по оси OZ соответственно, а её нижняя грань (плоскость $Y=0$) проходит через пол собора и поверхность земли вокруг него, а остальные грани представляют собой проницаемые поверхности.

На рис. 2 представлен трёхмерный вид снизу модели интерьера собора с удалённым полом, а на рис. 3 - его увеличенный фрагмент вблизи южных ворот.

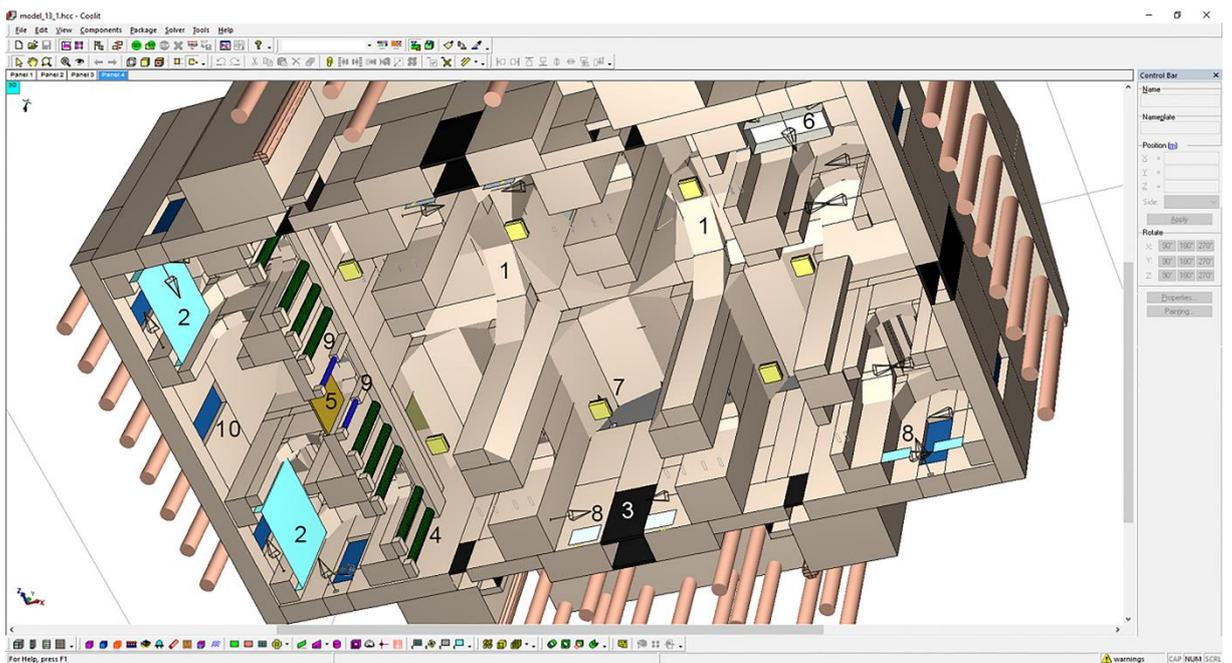


Рисунок 2. Трёхмерный вид компьютерной модели Исаакиевского собора с удалённым полом.
 1 – потолочное перекрытие, 2 – фальшь-стена у алтаря, 3 – дверь, 4 – колонна из малахита, 5 – царские врата, 6 – помещение для экскурсоводов, 7 – люстра, 8 – стенд, 9 – иконостас, 10 – окно.

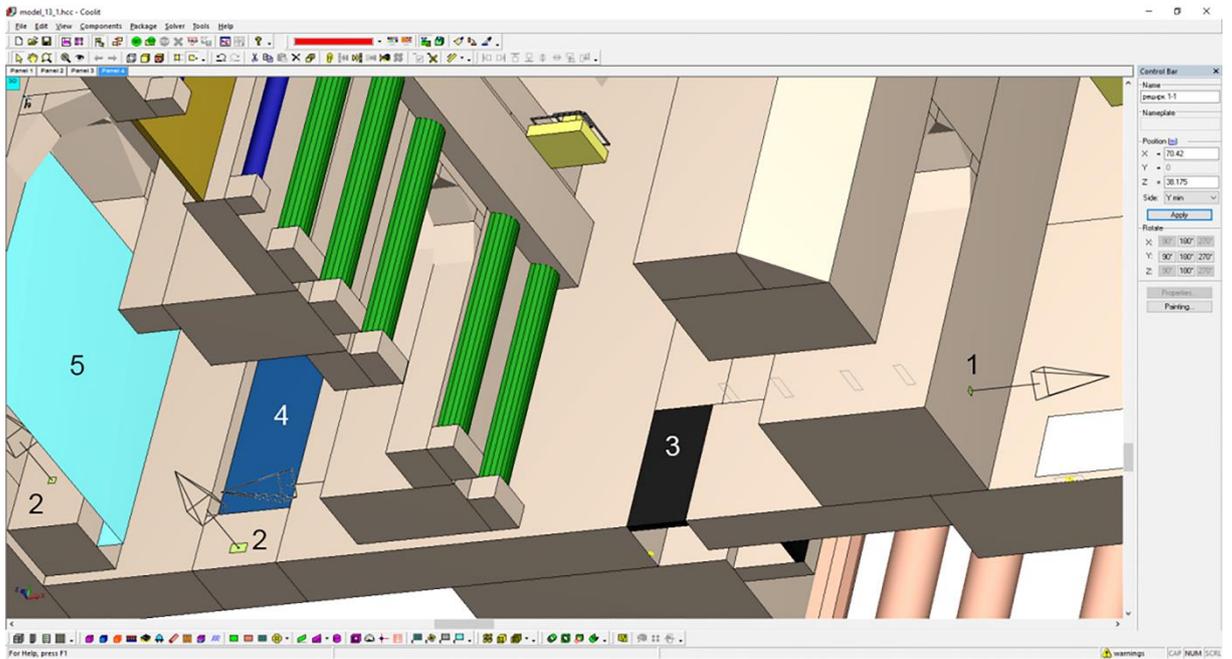


Рисунок 3. Увеличенный фрагмент рисунка 2 вблизи иконостаса у южной стены. 1 – душник, 2 – вентиляционная решётка, 3 – дверь, 4 – окно, 5 – фальшь-стена у алтаря.

Обеспечение геометрического соответствия компьютерной модели и реального помещения собора представляет собой только часть решаемой задачи. Кроме этого, следует задать соответствующие граничные условия на непроницаемых твёрдых и проницаемых границах расчётной области. Наконец, при расчёте нестационарных процессов необходимо задать начальные условия, то есть распределения скорости и температуры во всей расчётной области в начальный момент времени, а при расчёте стационарных процессов – начальное приближение для этих распределений.

На непроницаемых твёрдых границах расчётной области, (поверхность Земли вне собора и пол внутри собора), которые могут соприкасаться с воздухом или с трёхмерными твёрдыми и пористыми телами, а также на гранях объёмных и плоских тел ставятся следующие граничные условия.

Граничные условия на твёрдых поверхностях, контактирующих с воздухом. В этом случае в качестве граничных условий к уравнениям переноса импульса при ламинарных режимах течения используются стандартные условия прилипания и непроницаемости:

$$V_{\tau} = 0, \quad (13)$$

$$V_n = 0, \quad (14)$$

где V_{τ} и V_n – касательная и нормальная к поверхности составляющие вектора скорости соответственно.

Для постановки граничных условий к уравнению переноса импульса и к уравнению переноса турбулентной вязкости (модель турбулентности v_t -92) при расчёте турбулентных течений используется стандартный подход, базирующийся на введении так называемых стеночных функций. В рамках данного подхода граничные условия зависят от того, разрешает или не разрешает используемая конечно-разностная сетка вязкий подслой.

В первом случае, то есть при выполнении условия:

$$d^+ = \frac{d v^*}{\nu} \leq 1 \div 2, \quad (15)$$

(d – расстояние до стенки от первого пристенного узла, $v^* = (\tau_w / \rho)^{0.5}$ – динамическая скорость, τ_w – трение на стенке) на стенке используются условия прилипания и непроницаемости (13), (14) для скорости и условие равенства нулю коэффициента турбулентной вязкости ($v_t = 0$).

Во втором случае (если располагаемые вычислительные ресурсы не позволяют использовать сетку, удовлетворяющую условию (15)), необходимо построить сетку, в которой первый пристеночный узел располагается в области действия «закона стенки», то есть при $30 \leq d^+ \leq 150$. При этом профиль

тангенциальной по отношению к твёрдым стенкам составляющей вектора скорости определяется соотношением:

$$\frac{u_\tau}{v^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{E}{1 + 0.3 \frac{\rho k_s v^*}{\mu}} \frac{\rho y v^*}{\mu} \right), \quad (16)$$

где k_s – высота элемента шероховатости поверхности стенки, u_τ – значение тангенциальной составляющей вектора скорости в ближайшем к стенке узле конечно-разностной сетки, отстоящем от стенки на расстояние y , а κ и E – эмпирические постоянные:

$$\kappa = 0.42, E = 9.8. \quad (17)$$

Соотношение (16) определяет связь между скоростью u_τ и трением на стенке τ_w и используется в качестве граничного условия к уравнению баланса импульса (2) для тангенциальных по отношению к стенке составляющих вектора скорости. Оно позволяет решать уравнение переноса турбулентной вязкости (7) не до стенки, а до первого пристеночного узла, значение турбулентной вязкости в котором определяется из соотношения:

$$v_t = \kappa \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} y, \quad (18)$$

вытекающего из условия постоянства напряжения трения в области действия «закона стенки». Для нормальной к стенке составляющей вектора скорости на стенке используются условия непроницаемости (14).

В качестве граничных условий к уравнению энергии, в зависимости от условий теплового взаимодействия твёрдой стенки с окружающей средой, на ней могут задаваться условия первого или второго рода:

$$T = T_w(x, y, z, t), \quad (19)$$

$$q_w^{gas} = q_w(x, y, z, t). \quad (20)$$

Здесь T_w и q_w – заданные распределения температуры и теплового потока на рассматриваемом участке стенки. В виртуальной модели Исаакиевского собора поверхность Земли и пол предполагаются теплоизолированными, т.е. для них используется условие (20) в предположении, что тепловой поток $q_w^{gas} = 0$.

При выполнении условия (15), тепловой поток в стенку со стороны газа, входящий в соотношения (19), (20), определяется соотношением:

$$q_w^{gas} = -\lambda_{gas} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad (21)$$

где n – направление внутренней нормали к твёрдой поверхности.

В том случае, когда конечно-разностная сетка не разрешает вязкого подслоя (то есть используются стеночные функции), тепловой поток в стенку со стороны газа определяется с помощью "тепловых стеночных функций" [13]:

$$q_w^{gas} = \alpha_w (T_p - T_w), \quad (22)$$

где индексом « p » обозначено значение функции в первом от стенки узле конечно-разностной сетки, а коэффициент теплоотдачи α_w определяется по известному трению на стенке с помощью аналогии Рейнольдса:

$$\alpha_w = \left| \frac{\tau_w}{u} \right| C_p. \quad (23)$$

Граничные условия на твёрдых поверхностях, контактирующих с трёхмерными твёрдыми или проницаемыми телами. Необходимость задания динамических (для уравнения импульсов (2)) граничных условий возникает только при контакте твёрдой стенки с пористым телом. В этом случае в качестве граничных условий к системе уравнений фильтрации на поверхности пористого тела, граничащей с твёрдой стенкой, ставятся условия прилипания и непроницаемости (13), (14).

Что касается тепловых граничных условий на поверхности контакта твёрдой стенки с твёрдыми или пористыми объектами, то они могут быть двух типов:

$$T = T_w(x, y, z, t), \quad (24)$$

$$q_w^{object} = q_w(x, y, z, t), \quad (25)$$

где тепловой поток в стенку q_w^{object} определяется по формуле:

$$q_w^{object} = -\lambda_{object} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad (26)$$

Проницаемые границы расчётной области. Примерами таких границ являются разного рода отверстия, границы на которых задан профиль скорости воздушного потока, а также границы расчётной области полностью расположенные в свободном воздушном пространстве. В последнем случае, если рассматриваемая точка такой границы является «выходом» из расчётной области, то есть, если скорость в ней направлена наружу из рассматриваемого объёма, (направление скорости автоматически определяется программой в процессе расчёта), то в качестве граничного условия к уравнению движения в этой точке задаётся давление равное давлению в окружающем пространстве (индекс a):

$$p = p_a, \quad (27)$$

а для уравнений энергии и переноса турбулентной вязкости используются «мягкие» граничные условия вида:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \quad (28)$$

где φ означает либо температуру, либо турбулентную вязкость.

Если рассматриваемая точка отверстия является «входом» (скорость в ней направлена внутрь расчётной области), то в качестве граничного условия к уравнению движения в такой точке используется связь между локальным давлением и давлением в окружающей среде, определяемая уравнением Бернулли:

$$p_{bound} + \frac{\rho u_{bound}^2}{2} = p_a, \quad (29)$$

где u_{bound} - нормальная по отношению к границе составляющая вектора скорости.

Что касается температуры и турбулентной вязкости, то во входных точках открытых границ они полагаются равными соответствующим значениям этих параметров в окружающей среде.

Во всех случаях (независимо от направления скорости) тангенциальные к плоскости открытой границы составляющие вектора скорости полагаются равными нулю, то есть предполагается, что поток на входе/выходе направлен по нормали к границе, а нормальная компонента скорости определяется из уравнения неразрывности.

Для моделирования течения на входе/выходе вентиляционных или иных систем подачи газа, движение в которых создаётся устройствами, находящимися за границами рассматриваемого в задаче объёма используется бесконечно тонкий объект — «плоский источник массы». Одна сторона этого объекта является проницаемой для потока, а вторая - непроницаемой. При построении модели принимаются следующие допущения:

- объёмный расход (или нормальная к плоскости объекта скорость) воздуха на проницаемой стороне является известной (задаваемой) величиной;
- тангенциальная составляющая вектора скорости в плоскости объекта также представляет собой известную константу;
- в том случае, когда поток вытекает из объекта, температура, плотность и турбулентные характеристики потока являются заданными величинами; в противоположном случае

- считается, что производные по нормали к плоскости объекта от этих величин равны нулю (т.е. $\partial\varphi/\partial n=0$);
- непроницаемая сторона объекта является теплоизолированной (тепловой поток на ней равен нулю);

«Плоский источник массы» используется также для задания профиля скорости ветра у поверхности Земли, который является граничным условием к уравнению движения на границах расчётной области. Форма профиля скорости у поверхности Земли (зависимость скорости от высоты) взята из работы [15], а значения параметров соответствуют типу течения над центром города, в котором, по крайней мере, 50% зданий выше, чем 21 м.

3. Экспериментальная оценка точности используемой математической модели

Для оценки точности построенной модели в процессе работы над проектом были выполнены измерения модуля скорости и температуры в отдельных областях собора в осенний (при работе системы ОВК в режиме вентиляции) и в зимний (при её работе в режиме вентиляции и отопления) периоды. Измерения проводились с использованием термоанемометра способного проводить измерения в диапазоне скоростей 0.01-30.0 м/с погрешностью $\pm 1\% + 1d$ и температуры 0-45 °С с погрешностью ± 1 °С. Проведённые измерения можно разделить на две группы.

В частности, измерения первой группы проводились на решётках и душниках, через которые воздух подаётся внутрь собора. Их результаты использовались для задания граничных условий при проведении расчётов, что обеспечивало соответствие условий моделирования и условий эксперимента. Ко второй группе относятся измерения тех же величин во внутренних точках помещения собора и на рециркуляционных решётках. Эти измерения проводились как в зонах, характеризующихся наличием интенсивных струйных течений воздуха, истекающего из решёток и душников, так и в застойных зонах (по периметру аттиковой галереи и у отверстия внутреннего центрального купола), наличие которых было, в частности, обнаружено при проведении предварительных расчётов. Полученные при этом данные являются основой для оценки точности построенной математической модели.

3.1. Осенний период (режим вентиляции)

Измерение модуля скорости проводилось по линии вдоль южной стены обозначенной пунктиром на плане помещения Исаакиевского собора (см. рис. 4), измерения модуля скорости и температуры проводилось по линии перпендикулярной северной стене обозначенной пунктиром на плане, а также на переточных решётках, температура измерялась в точках, обозначенных цифрами.

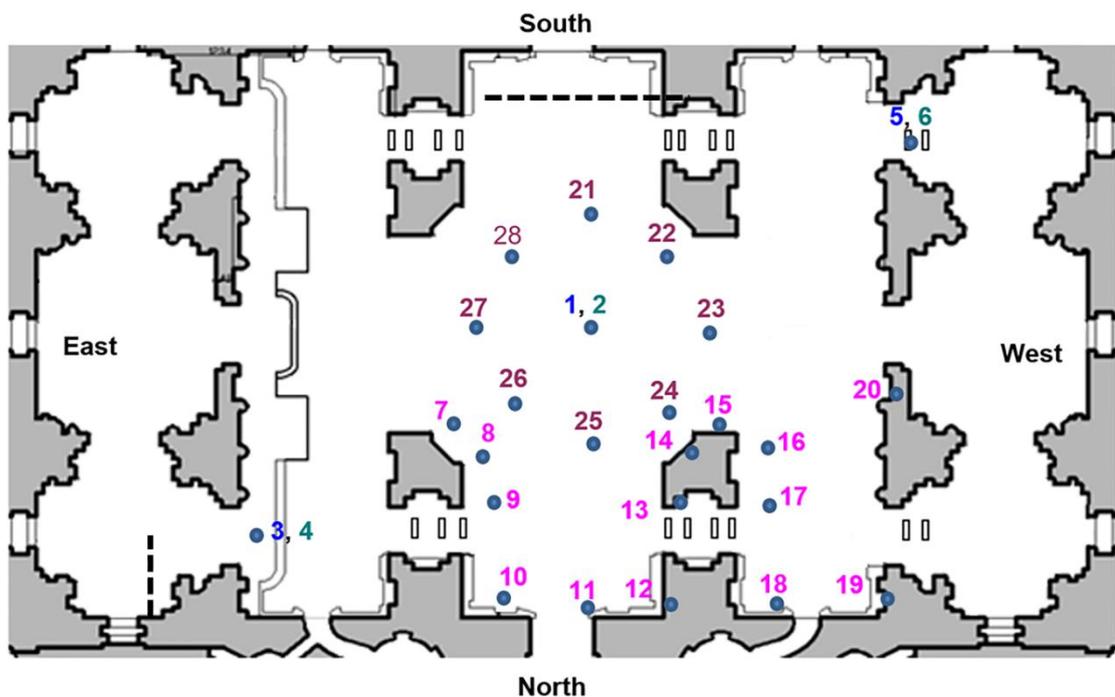


Рисунок 4. План помещения Исаакиевского собора. Цифрами обозначены точки измерения температуры: точки 1, 3, 5 расположены на полу; 2, 4, 6 – на высоте 1.5 м. над полом; 7–20 – вдоль аттиковой галереи на высоте ~ 25 м. над полом; 21–28 – на поверхности главного купола на высоте ~ 73 м. над полом. Штриховые линии – линии, вдоль которых измерялся модуль скорости и температура. Прямоугольниками, обозначены переточные решётки в полу собора, на которых также измерялся модуль скорости и температура потока.

С использованием в качестве граничных условий значений температур и скоростей воздуха на выходах из системы отопления, определённых в процессе эксперимента при температуре наружного воздуха ~ 16 °С был проведён расчёт полей скорости и температуры в помещении собора. При этом использовалась неравномерная (со сгущением в окрестности твёрдых поверхностей) декартова сетка с числом узлов 237*128*189 по координатам X, Y и Z соответственно (общее число ячеек сетки составляет ~ 5,7 миллиона). Ниже приводится сравнение результатов расчёта с экспериментом.

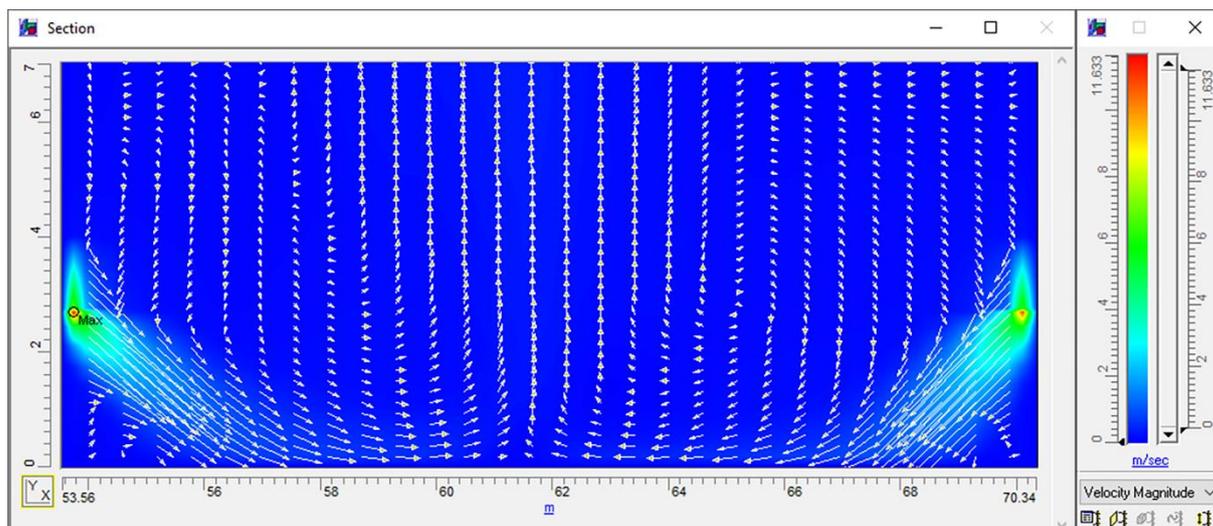


Рисунок 5. Поле вектора скорости воздушного потока в вертикальном сечении YX, проходящем через центры душек (пунктирная линия, параллельная южной стене собора на рис. 4, является линией пересечения сечения YX и пола собора).

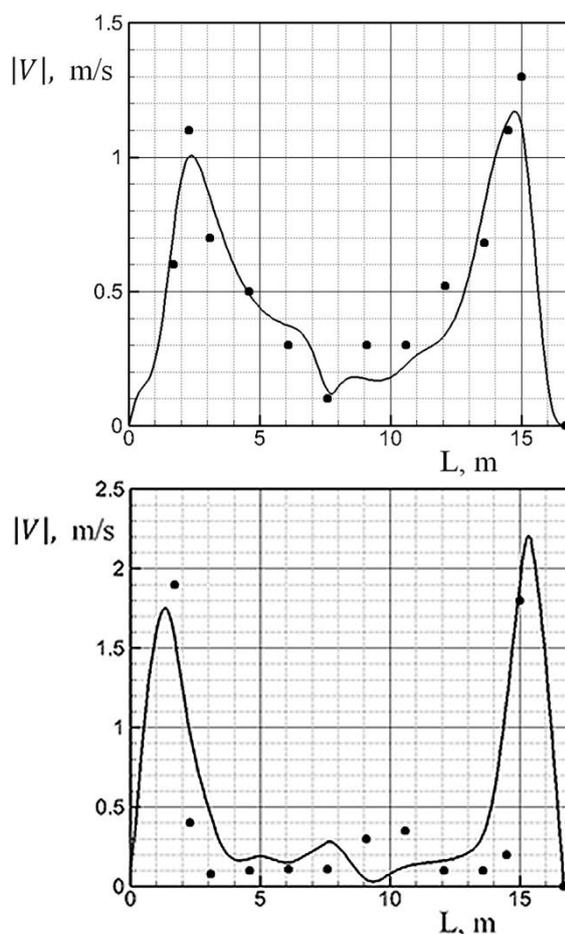


Рисунок 6. Сравнение экспериментальных (символы) и расчётных (сплошные линии) профилей модуля скорости в плоскости YX, проходящей через центры душек на колоннах вдоль горизонтальных линий, находящихся на высоте 0.6 м. (верх) и 1.4 м. (низ) от пола. L – расстояние от левой колонны до текущей точки.

Прежде всего, отметим, что уровень температуры в соборе был практически постоянным и составлял 19.6 °С. Что касается согласования с экспериментом расчётного поля скорости, то, как следует из представленных ниже данных, оно является вполне удовлетворительным.

Для анализа была выбрана зона, в которой возникает достаточно интенсивное течение воздуха у пола собора в пространстве между колоннами, на которых располагаются душники (см. пунктирную линию вдоль северной стены на рис. 4). Измерения модуля скорости проводились в вертикальном сечении YX , проходящем через центры этих душников вдоль горизонтальных линий, расположенных на высоте 0.6 м. и 1.4 м. от пола (см. рис. 5, 6).

В частности, на рис. 5 показано рассчитанное поле вектора скорости воздушного потока в вертикальной плоскости, проходящей через центры душников, а на рис. 6 представлены расчётные и экспериментальные распределения модуля скорости вдоль линий.

Следует отметить, что анализ приведённого на рис. 5 расчётного поля скорости позволяет выявить некоторые характерные особенности рассматриваемого потока. В частности, обращает на себя внимание наличие максимумов скорости вблизи колонн собора, появление которых связано с наклонными струями, истекающими из душников. Их разворот у поверхности пола и движение вдоль него навстречу друг другу приводит к появлению локального минимума скорости в точке $L \approx 7.8$ м. (см. рис. 6). Наличием этих струй объясняется также тот факт, что скорость потока вблизи пола ($h=0.6$ м.) больше, чем на удалении от него ($h=1.4$ м.).

На рис. 7 приведены расчётные и экспериментальные профили скорости вдоль длинной линии симметрии рециркуляционных решёток, расположенных вдоль северной стены собора (см. рис. 4, нумерация решёток слева направо). Из рисунка видно, что разработанная модель вполне удовлетворительно описывает течение в окрестности выходных решёток. Следует также обратить внимание на то, что профили скорости на всех рассмотренных решётках близки между собой. Это позволяет заключить, что поле давления внутри собора является достаточно однородным, что также непосредственно подтверждается расчётными данными. Изменения величины давления в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте 0.05 м. от пола собора в основной части помещения не превышает одного паскаля.

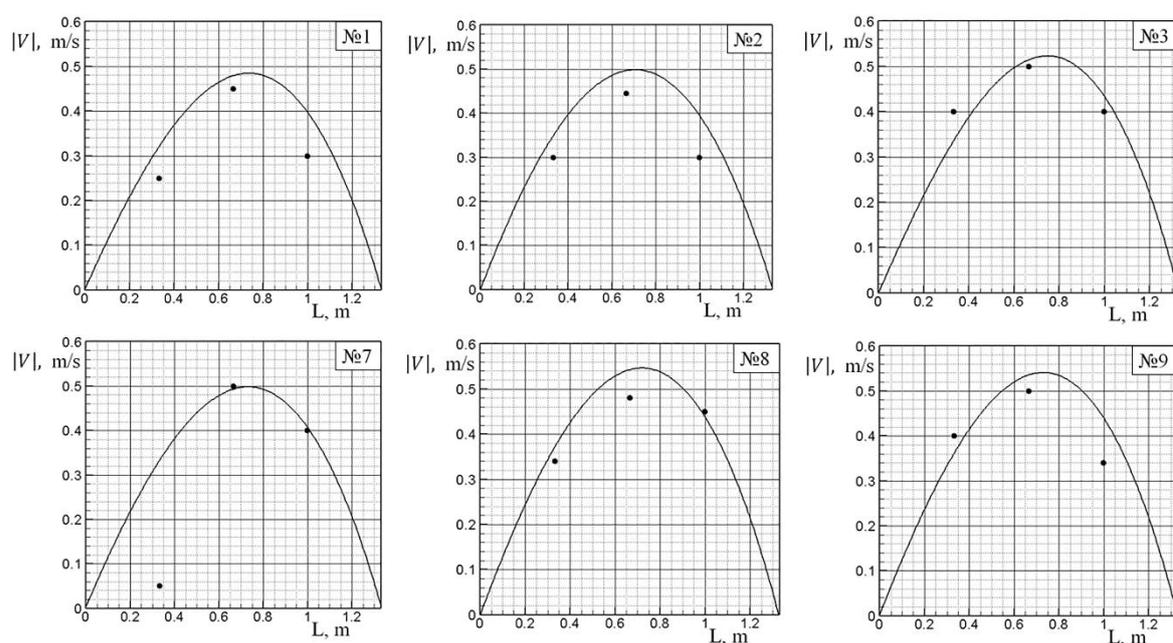


Рисунок 7. Расчётные (линии) и экспериментальные (точки) профили скорости вдоль длинной оси симметрии рециркуляционных решёток расположенных вдоль северной стены собора. Нумерация решёток идёт слева направо, см. рис. 4.

3.2. Зимний период (режим тепловоздушного отопления)

Эксперимент проводился при температуре наружного атмосферного воздуха $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ и юго-западном ветре 3 м/с . В соборе работали 5 из 10 тепловоздушных установок. Расчёт полей скорости и температуры проводился на такой же конечно-разностной сетке (с числом ячеек $\sim 5,7$ миллионов), как и расчёт изотермического течения (см. предыдущий раздел).

Ниже приводится сравнение результатов расчёта с экспериментом. На рис. 8 представлены рассчитанные поля вектора скорости и температуры в вертикальной плоскости YZ помещения собора, расположенной перпендикулярно его северной стене и проходящей через центр вентиляционной решётки (пунктирная линия перпендикулярная северной стене, см. рис. 4, является линией пересечения плоскости YZ и пола собора). Из рисунка видно, что воздушная струя относительно тёплого воздуха, истекающая из вентиляционной решётки, “всплывает” в окружающем холодном воздухе под действием силы Архимеда, в результате чего в центре рассматриваемой плоскости возникает ярко выраженной подъёмное течение, а область повышенной температуры оказывается весьма ограниченной и находится в левом нижнем углу части помещения.

Что касается адекватности разработанной компьютерной модели, то о ней можно судить по сопоставлению результатов расчёта с соответствующими результатами измерений, представленному на рис. 9. Сравнение расчётных и экспериментальных данных позволяет заключить, что разработанная модель не только качественно правильно описывает все характерные особенности весьма сложных полей скорости и температуры в рассматриваемой плоскости, но и с достаточно высокой точностью предсказывает абсолютные значения температуры и модуля скорости в точках измерения.

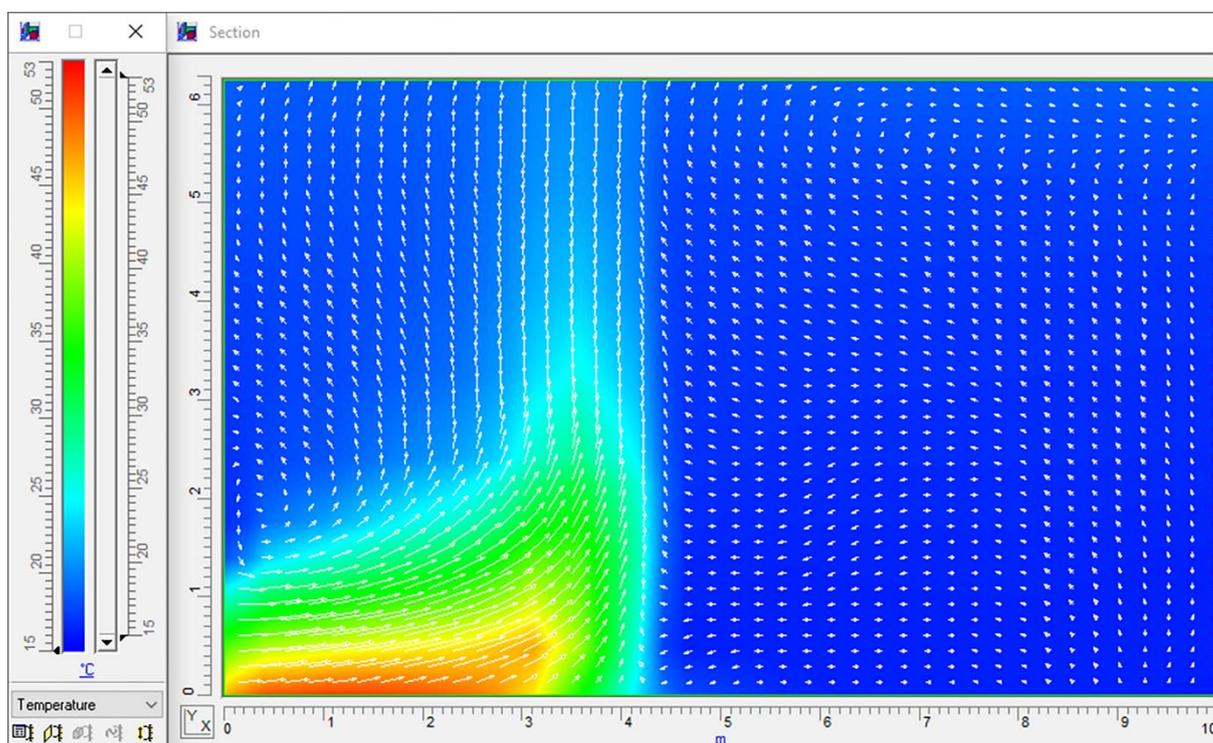


Рисунок 8. Поле вектора скорости и температуры воздушного потока в вертикальном сечении YZ, проходящем через центр вентиляционной решётки расположенной у пола на северной стене собора (пунктирная линия перпендикулярная северной стене собора на рис. 4 является линией пересечения сечения YZ и пола собора).

Такой же вывод можно сделать на основе сопоставления результатов расчётов с измерениями, выполненными в характерных точках помещения собора (положение точек в объёме помещения собора см. на рис. 4). Измерения значений температуры проводились на переточных решётках, на поверхности пола собора и на высоте $1,5\text{ м}$ над уровнем пола, а также вдоль аттиковой галереи на высоте 25 м и вдоль кромки отверстия большого внутреннего купола на высоте 73 м над полом. Анализ результатов показал, что максимальное различие расчёта и эксперимента по температуре (оно наблюдается на преточных решётках) равно $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($7,8\%$), а в подавляющем большинстве точек оно составляет $\sim 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sim 3\%$).

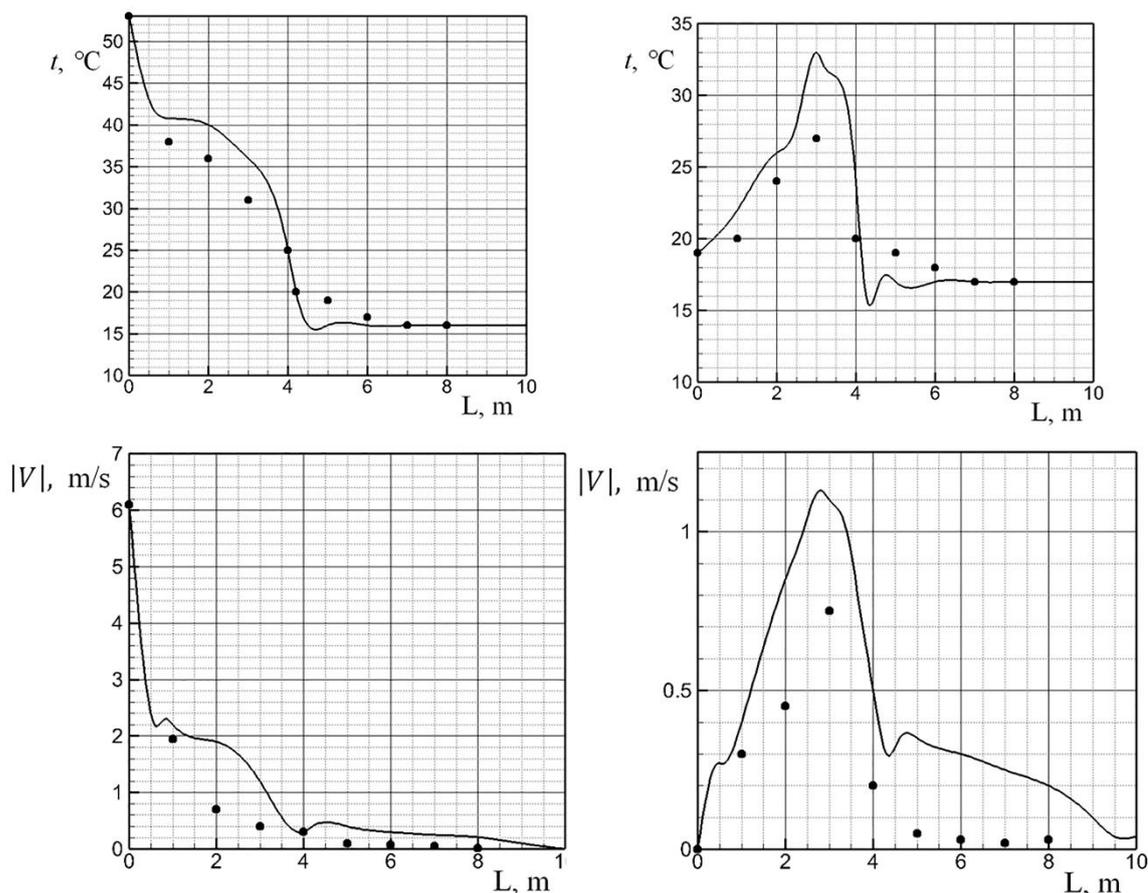


Рисунок 9. Сравнение экспериментальных (символы) и расчётных (сплошные линии) профилей модуля скорости и температуры в вертикальной плоскости YZ, проходящей через центр вентиляционной решётки и пунктирную линию перпендикулярную северной стене собора (см. рис. 4). Линии, вдоль которых проводились измерения, расположены параллельно полу на высоте 0.4 м. (графики расположены слева) и на высоте 1.5 м. (графики – справа). L – расстояние от стены собора.

Таким образом, анализ результатов, представленных в настоящем разделе, позволяет заключить, что разработанная компьютерная модель аэродинамики и процессов теплопереноса в помещении Исаакиевского собора адекватно описывает эти процессы и обеспечивает достаточно точное предсказание характеристик воздушной среды в соборе. Этот вывод открывает возможность использования данной модели для анализа эффективности существующей системы теплоснабжения собора, а также для её усовершенствования и выработки рекомендаций для проектирования новой системы ОВК.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Анализ возможных путей достижения нормативного температурного состояния поверхности интерьера собора в зимний период

На первом этапе исследований проводились расчёты аэродинамики и температурного состояния Исаакиевского собора при фиксированных погодных условиях. Целью этих исследований был поиск наиболее простых (требующих минимальных изменений существующей системы теплоснабжения) путей обеспечения требуемого температурного состояния поверхности интерьера при стационарных условиях. Температура наружного атмосферного воздуха задавалась равной $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соответствовала условиям проведения экспериментов (см. предыдущий раздел работы).

4.1.1. Критерии, используемые для оценки работы системы теплоснабжения

Отметим, что разработанная математическая модель позволяет получить исчерпывающую информацию как о температуре воздуха внутри помещения собора, так и о распределении температуры по поверхности его интерьера. Однако использование всей этой информации для оценки эффективности работы системы теплоснабжения является, с одной стороны, трудно реализуемым на практике, а с другой – избыточным, поскольку для этой цели достаточно знание температуры лишь в некоторых «критических» (наиболее важных с точки зрения ценности и чувствительности к температурным условиям) точках поверхности интерьера. Такой подход оправдан также тем

обстоятельством, что при эксплуатации разрабатываемой новой системы теплоснабжения проведение контрольных измерений температуры также возможно лишь в некоторых «критических» точках поверхности.

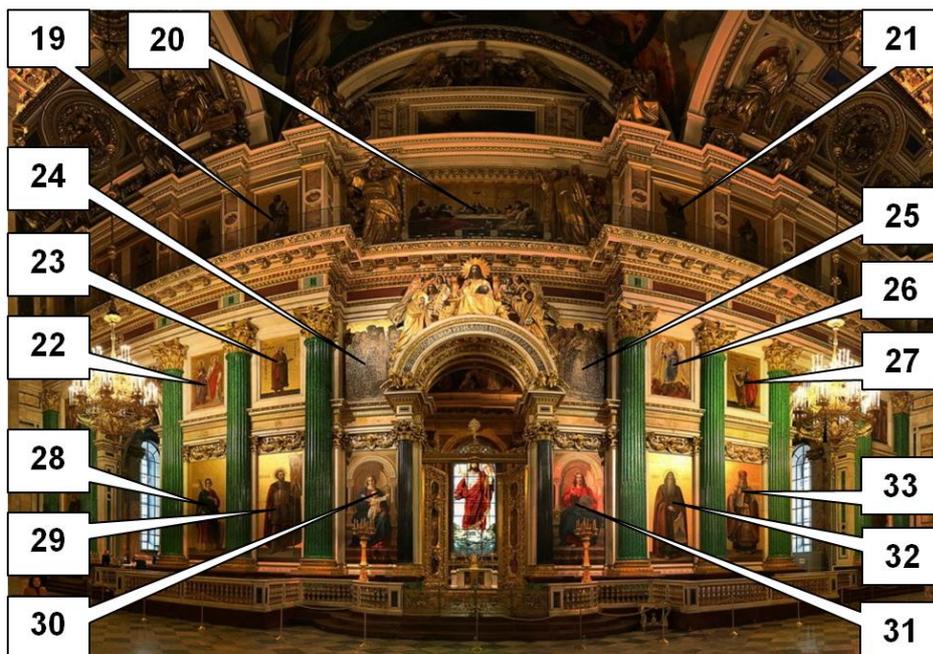


Рисунок 10. Положение «критических» точек на иконостасе (привязка к фотографическому изображению иконостаса Исаакиевского собора): 19-21 на высоте 18 м. над полом (III ярус); 22-27 на высоте 12 м. (II ярус); 28-33 на высоте 3 м. (I ярус).



Рисунок 11. Положение некоторых «критических» точек на поверхности художественного интерьера собора (привязка к фотографическому изображению части внутренней поверхности).

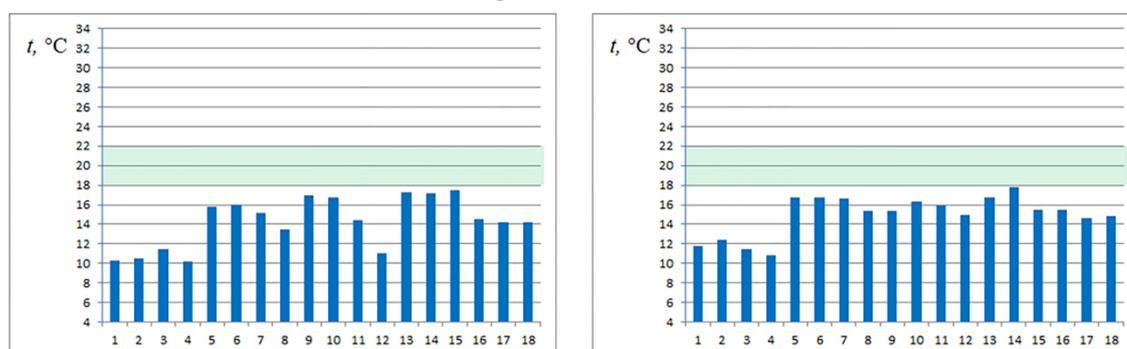
«Критические» точки, находятся на наиболее чувствительных к температурным условиям элементах художественного оформления поверхности интерьера собора. Точки 1–4 расположены в центрах плафонов угловых куполов, на которых находится роспись маслом по штукатурке. Точки 5, 8 и 9–12 расположены на стенах южного и северного аттиков собора на высоте 21 метра от пола. В точках 5, 8 и 9–12 находится роспись маслом по штукатурке, а в точках 6, 7 и 10, 11 – мозаика. Остальные критические точки (13–18) располагаются на поверхности барабана главного купола, где находится роспись маслом по штукатурке. В дополнение к описанным выше основным критическим точкам при анализе результатов расчётов температурного состояния внутренней поверхности собора привлекались ещё 29 точек, расположенных на иконостасе (см. рис. 10), на колоннах и на потолке (см. рис. 11). На нижнем и среднем уровнях (ярусах) иконостаса находится мозаика, а на верхнем – масло по холсту. Колонны в соборе облицованы мрамором, а потолок расписан маслом по штукатурке.

Таким образом, критерий эффективности работы системы теплоснабжения формулируется следующим образом: система ОВК должна обеспечивать нахождение температуры в критических точках в границах принятого в Исаакиевском соборе нормативного диапазона температур $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

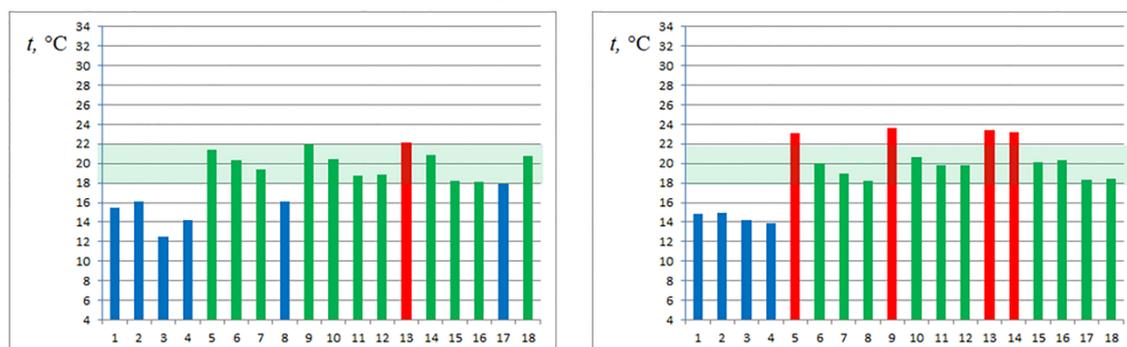
4.1.2. Исследование влияния числа работающих тепловых установок и расхода подаваемого через них тёплого воздуха

Всего в Исаакиевском соборе работают десять тепловых установок (ТУ). Восемь установок подают тёплый воздух через решётки и душики, расположенные по периметру помещения собора, а две ТУ подают воздух через окна южной и северной световых галерей. Условно, ТУ можно разделить на угловые, подающие воздух в угловые зоны и вблизи западной и восточной стен помещения и центральные, подающие воздух по центру северной и южной стен собора. Для выяснения вопроса о том, возможно ли с их помощью обеспечить требуемый уровень температуры в критических точках внутренней поверхности интерьера собора была проведена серия стационарных расчётов, в которой варьировалось число включённых ТУ и расход подаваемого через них тёплого воздуха. Как уже отмечалось, эти расчёты выполнены при погодных условиях, соответствующих условиям проведения экспериментов ($t = -13\text{ }^{\circ}\text{C}$, юго-западный ветер; скорость ветра 3 м/с). Практика эксплуатации системы теплоснабжения собора свидетельствует о том, что для обеспечения в нём более или менее приемлемого уровня температуры в зимний период необходимо включение минимум 5-и из имеющихся 10-и тепловых установок. С учётом этого, число включённых установок в расчётах варьировалось от 5 до 10. Некоторые результаты расчётов показаны на рис. 12.

5 heating/ventilation units



6 heating/ventilation units



10 heating/ventilation units

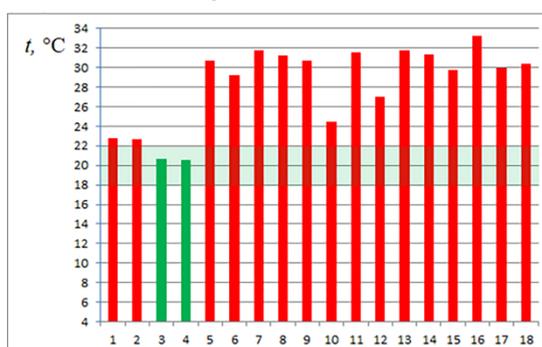


Рисунок 12. Диаграммы температуры поверхности в критических точках 1–18. Диаграммы слева: работают центральные и угловые ТУ у западной стены; диаграммы справа: работают центральные и угловые ТУ у восточной; нижняя диаграмма: все ТУ работают.

В частности, на рис. 12 (верхний ряд) сравниваются типичные температурные диаграммы при работе пяти из десяти ТУ. Видно, что ни в первом, ни во втором случае требуемый температурный режим не обеспечивается ни с точки зрения среднего уровня температуры (он существенно ниже норматива 20 °С), ни с точки зрения диапазона её изменения, который в обоих случаях составляет 7–8 °С при нормативном значении 4 °С. Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что наиболее холодными являются критические точки 1–4, расположенные в центрах плафонов угловых куполов, а наиболее горячими – точки 5, 9 и 13, 14, расположенные на стенах аттиков и на поверхности барабана главного купола.

На рис. 12 (средний ряд) приведены два примера, позволяющие судить об эффективности системы теплоснабжения при работе шести ТУ. Видно, что при этом уровень температуры во многих критических точках соответствует нормативу, однако часть поверхности (точки 5, 9 и 13, 14) оказывается перегретой, а часть (точки 1–4) – по-прежнему остаётся слишком холодной. В результате диапазон изменения температуры, оказывается даже несколько выше, чем при работе 5-и установок (составляет примерно 10 °С).

При дальнейшем увеличении числа работающих установок данная тенденция (рост среднего уровня температуры и сохранение или даже расширение диапазона её изменения) сохраняется. Об этом наглядно свидетельствует рис. 12 (низ), на котором показана температурная диаграмма при работе всех десяти ТУ. Аналогичная картина (слишком широкий диапазон изменения температуры) наблюдается и в дополнительных критических точках, расположенных на иконостасе и на колоннах и участках потолка вдоль южной и северной стен собора.

Таким образом, проведённые расчёты позволяют заключить, что добиться удовлетворительного температурного состояния внутренней поверхности собора путём изменения числа работающих ТУ невозможно.

К сожалению, такой же вывод следует и из анализа результатов расчётов температурного состояния поверхности интерьера собора при различных значениях расхода тёплого воздуха. В качестве примера на рис. 13 представлены температурные диаграммы для случаев работы всех десяти ТУ с расходом воздуха, уменьшенным на 25% и 50% от номинального значения.

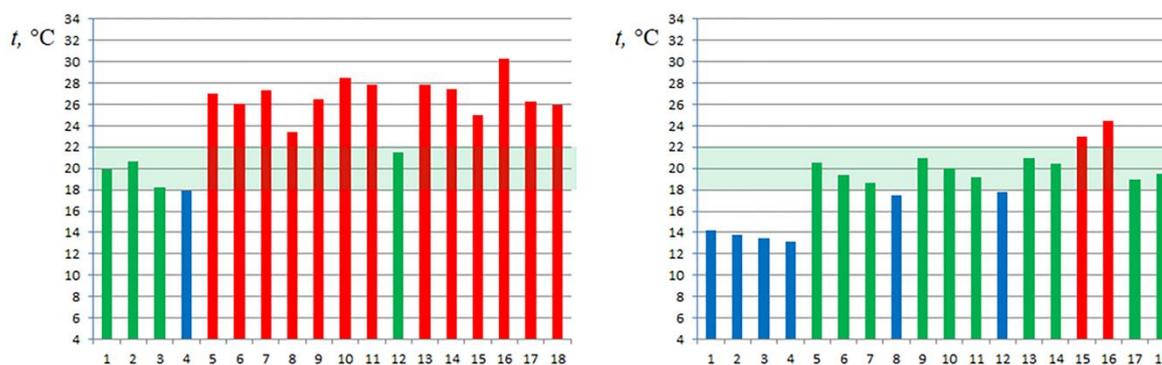


Рисунок 13. Диаграммы температуры поверхности в критических точках 1–18 при работе всех десяти ТУ: слева – расход воздуха уменьшен на 25% от номинального значения; справа – на 50%.

4.1.3. Термостатирование помещения собора

Термостатирование помещения широко используется в музеях и других аналогичных общественных и культовых зданиях. Оно достигается при подаче в помещение воздуха с температурой, которую необходимо поддерживать согласно существующим нормативам (в рассматриваемом случае 20 °С). При этом при достаточно высоких кратностях воздухообмена (или, что то же самое, расходах подаваемого в собор тёплого воздуха) гарантируется создание в помещении практически изотермических, то есть идеальных с точки зрения сохранности художественных ценностей, условий. Однако применимость этого способа в огромном объёме помещения Исаакиевского собора далеко не очевидна, поскольку необходимые для этого расходы воздуха могут оказаться недопустимо большими.

Для проверки возможности термостатирования Исаакиевского собора были проведены расчёты его температурного состояния при работе всех десяти ТУ и подаче через них воздуха с температурой 20 °С как при номинальном расходе, так и при расходах, увеличенных в 6 и 12 раз по сравнению с номинальным. Эти расчёты выполнены для тех же погодных условий, что и расчёты, представленные в предыдущем разделе, то есть при температуре окружающего воздуха -13 °С и юго-западном ветре со скоростью 3 м/с. Полученные результаты показаны на рис. 14, из которого следует, что даже при двенадцатикратном, то есть заведомо невозможном на практике, увеличении расхода, температура значительной части внутренней поверхности собора (главным образом в области угловых куполов) не попадает в нормативный диапазон.

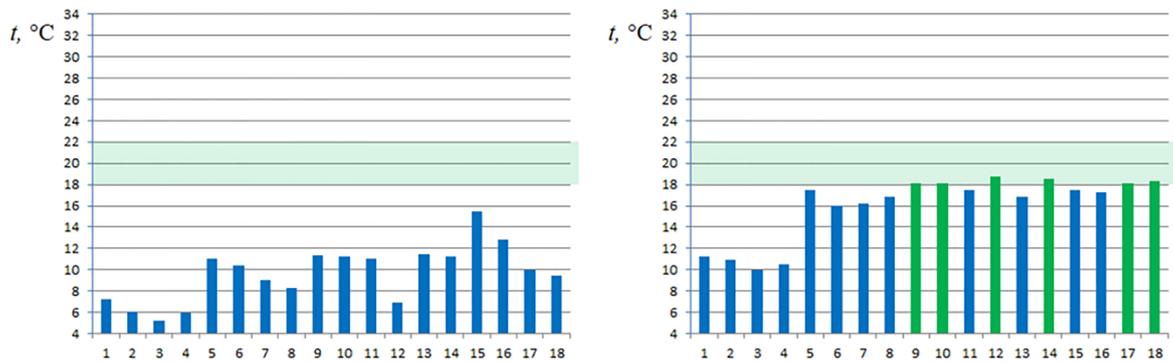


Рисунок 14. Диаграммы температуры поверхности в критических точках 1–18 при работе всех десяти ТУ при температуре подаваемого воздуха 20°C: Слева – номинальный расход воздуха; справа – расход воздуха в 12 раз выше номинального.

Таким образом, без принципиальной реконструкции системы воздухораспределения (значительного увеличения числа воздушных терминалов) термостатирование поверхности интерьера Исаакиевского собора путём подачи в него воздуха с температурой, соответствующей оптимальным условиям хранения, является невозможным.

В связи с этим, а также, учитывая результаты расчётов, свидетельствующие о том, что наиболее холодной областью внутренней поверхности собора являются его угловые купола, была рассмотрена возможность применения комбинированного подхода, в рамках которого через центральные ТУ подаётся воздух с температурой 20 °С, а через остальные ТУ – воздух, нагретый до номинальной температуры 45 °С. К сожалению, расчёты показали, что комбинированный подход, хотя и обеспечивает заметное улучшение температурного состояния поверхности интерьера по сравнению как с чистым термостатированием, так и чистым отоплением, но, тем не менее, также как и эти подходы не приводит к успеху.

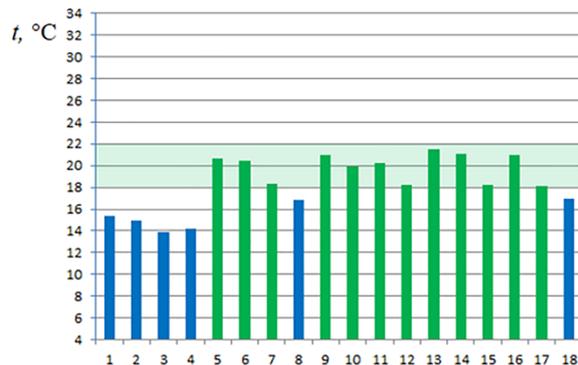


Рисунок 15. Диаграмма температуры поверхности в критических точках 1-18 при работе десяти ТУ с номинальными расходами и подачей через центральные ТУ воздуха с температурой 20 °С, а через остальные ТУ воздуха с температурой 45 °С.

Таким образом, для решения поставленной задачи, то есть для обеспечения нормативных требований к температурному режиму поверхности интерьера Исаакиевского собора без кардинальной реконструкции его системы теплоснабжения, необходим поиск каких-либо других подходов. Один из таких подходов представлен в следующем разделе работы.

4.2. Теплоизоляция пола чердачного помещения

Результаты расчётов, представленные на рис. 13–15, показали, что независимо от количества тепловоздушных установок и значений их параметров наиболее холодными являются зоны плафонов угловых куполов (критические точки 1–4). Анализ полей температуры в здании позволил сделать предположение, что подобное распределение температуры объясняется охлаждением поверхности интерьера за счёт интенсивной теплоотдачи в неотапливаемое чердачное помещение собора. Это относительно легко устранить, утеплив пол чердака. Чтобы выяснить, действительно ли это решает проблему, была проведена серия расчётов, в которых предполагалось, что пол чердака покрыт слоем изоляции с теплопроводностью 0,04 Вт/(м*К) (типичное значение теплопроводности современных утеплителей), а его толщина варьируется. Значения остальных параметров соответствовали варианту расчёта, представленному на рис. 15.

Проведённые расчёты показали, что, при толщине изоляционного слоя 0.3 м для области над угловыми куполами и 0.1 м для остальной части пола чердака температура во всех 18 основных критических точках находится в требуемом диапазоне температур (см. левую диаграмму на рис. 16). Более того, как видно на правой диаграмме рис. 16, все, кроме 2-х из дополнительных точек 19–47,

расположенных на поверхности иконостаса, центральных колонн и потолка собора в его плоскости симметрии и вдоль южной и северной стен также попали в допустимый диапазон температур.

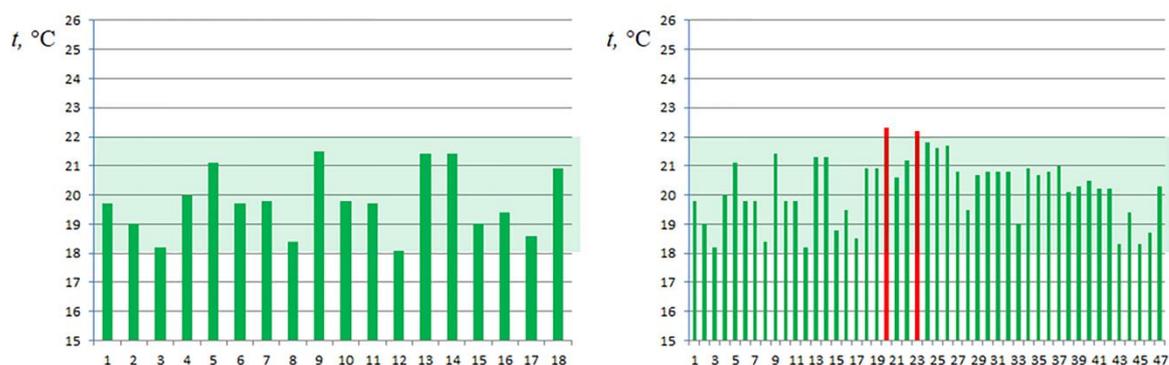


Рисунок 16. Диаграммы температуры поверхности интерьера в критических точках 1–18 (слева) и 1–47 (справа) при толщине теплоизоляции пола чердачного помещения 0.1 м. и поверхности малых куполов 0.3 м.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что при рассмотренных типичных зимних погодных условиях (температура $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, западный ветер 3 м/сек.) существующая система теплоснабжения Исаакиевского собора способна обеспечить нормативное состояние всей поверхности интерьера собора при наличии теплоизоляционного покрытия пола чердачного помещения собора слоем теплоизоляции толщиной 10 см. и поверхностей малых куполов слоем толщиной 30 см. Однако, при этом остаётся неясным вопрос о том возможно ли это и при других погодных условиях, который рассмотрен в следующем разделе.

4.3. Влияние погодных условий на эффективность работы ОВК

Была проведена серия расчётов, в процессе которых для достаточно широкого диапазона изменения погодных условий подбирались параметры тепловоздушных установок, обеспечивающие нормативное температурное состояния поверхности интерьера собора при выбранных толщинах теплоизоляции пола и поверхностей малых куполов чердачного помещения (0.1 м. и 0.3 м. соответственно). В этой серии варьировалась как температура окружающего воздуха, так и направление, и скорость ветра. Однако анализ предварительных расчётов показал, что изменение характеристик ветра незначительно влияет на температуру поверхности интерьера собора. Поэтому в основной серии расчётов в качестве единственного параметра, характеризующего погодные условия, была выбрана температура окружающего воздуха, которая изменялась в диапазоне от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведении расчётов предполагалось, что реализуется комбинированная схема теплоснабжения, то есть, что работают все ТУ собора; температура воздуха, подаваемого через угловые ТУ, задаётся равной $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура воздуха, подаваемого через центральные ТУ равна $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расходы воздуха через эти ТУ не изменялись и полагались равными расходам, измеренным в процессе экспериментальных исследований. В результате единственной величиной, варьируемой в расчётах, являются расходы воздуха G через угловые установки. При этом предполагается, что они изменяются одновременно во всех этих установках с единым коэффициентом пропорциональности.

Результаты расчётов показали, что отношение скорректированного таким образом расхода к номинальному расходу (при $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$) для наружной температуры, меняющейся в диапазоне от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ может быть аппроксимировано линейной зависимостью (см. рис. 17) имеющий следующий вид:

$$G/G_{\text{nominal}} = -0.0154t + 0.8, \quad (30)$$

где t - температура наружного воздуха в градусах Цельсия.

Анализ температурных диаграмм представленных на рис.18 позволяет заключить, что использование линейной коррекции расхода (30) обеспечивает необходимый температурный диапазон практически всей поверхности внутренних помещений собора. Однако с понижением наружной температуры ($t < -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, пунктирная линия на рис. 17) такой коррекции расхода G/G_{nominal} становится недостаточно. Это видно из температурной диаграммы при температуре наружного воздуха $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение температуры по критическим точкам становится существенно неравномерным, причём температуры в 30% критических точек выходят из нормативного диапазона температур (имеется как перегрев поверхности интерьера, так и её недогрев, см. рис. 19).

Анализ температурных полей при низких температурах наружного воздуха ($t < -15\text{ }^{\circ}\text{C}$) показал, что в этих условиях одной теплоизоляции пола чердака собора недостаточно. Для подобных низких температур было предложено дополнительно отапливать чердачное помещение за счёт подачи туда тёплого воздуха через вентиляционные отверстия в полу чердака. На рис. 20 представлена температурная диаграмма полученная при тех же условиях, что и на рис. 19, но при нагреве чердака

воздухом +10 °С с суммарным расходом 1 м³/с. Видно, что в этом случае система ОВК обеспечивает требуемый температурный диапазон во всех критических точках, за исключением нескольких, но и в них отклонения от нормативного диапазона температур не превышает 1 °С.

Таким образом, на основе проведённых расчётов, был предложен следующий алгоритм для системы ОВК собора при стационарных погодных условиях. При температуре наружного воздуха меняющегося в диапазоне [-25 °С, 0°С] центральные ТУ подают воздух с постоянным номинальным расходом при температуре 20 °С, угловые ТУ подают воздух с температурой 45 °С с расходом, определяемым в соответствии с уравнением (30). Наконец, при температуре наружного воздуха из диапазона [-25 °С, -15 °С], осуществляется дополнительный обогрев чердачного помещения собора за счёт подачи туда воздуха с суммарным расходом 1 м³/с при температуре 10 °С.

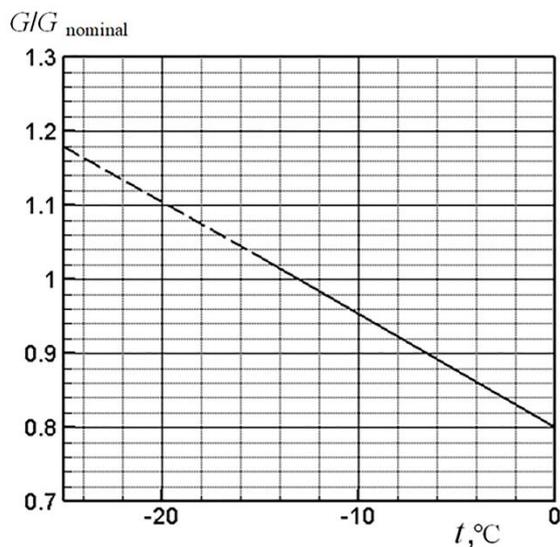


Рисунок 17. Зависимость отношение требуемого расхода через угловые ТУ к номинальному расходу от температуры наружного воздуха.

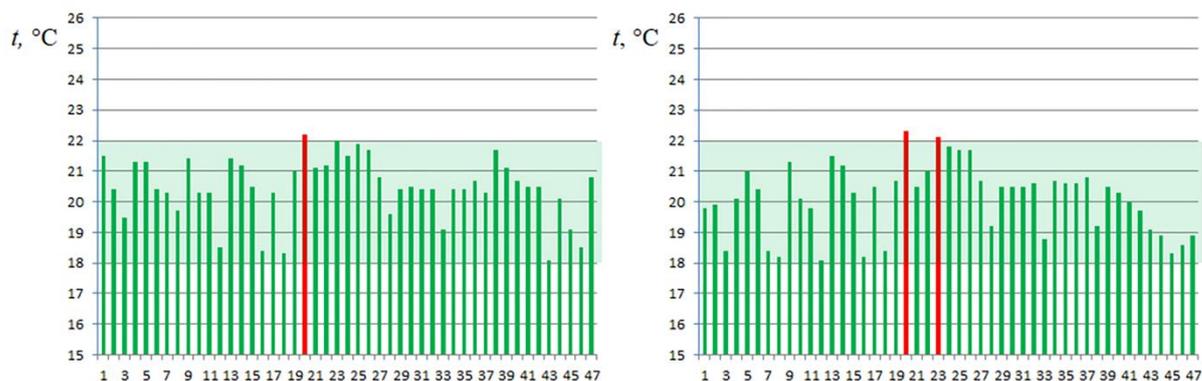


Рисунок 18. Диаграммы температур поверхности интерьера в критических точках 1–47 при температуре наружного воздуха 0 °С (слева) и -10 °С (справа) при значениях отношения $G/G_{nominal}$, определённых по уравнению (30).

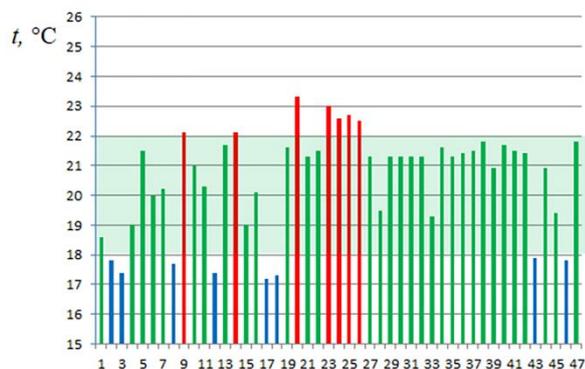


Рисунок 19. Диаграмма температуры в критических точках 1–47 при температуре наружного воздуха - 25 °С при значении отношения $G/G_{nominal}$ определённого согласно уравнению (30).

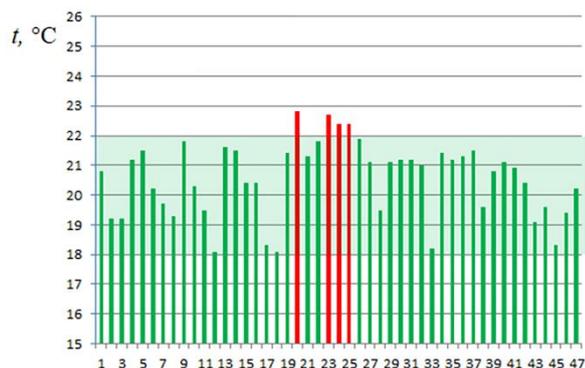


Рисунок 20. Диаграмма температуры в критических точках 1–47 при тех же условиях как на рис. 19, но с тепловоздушным отоплением чердачного помещения.

4.4. Алгоритм управления системой ОВК при нестационарных погодных условиях

Для построения алгоритма управления расходами тёплого воздуха через угловые ТУ в случае нестационарных погодных условий необходимо, каким-либо образом обобщить описанный выше простой алгоритм, предназначенный для стационарных условий, на этот гораздо более сложный случай. При этом следует, прежде всего, выбрать «стратегию» управления расходом при нестационарных условиях или, иными словами, определить параметры, на основе которых осуществляется это управление. Как, следует из уравнения (30) в качестве управляющего параметра при стационарных погодных условиях используется температура наружного воздуха. Однако в силу огромной тепловой инерции здания Исаакиевского собора, возможность использования этого подхода при нестационарных погодных условиях далеко не очевидна даже в относительно короткие периоды незначительных колебаний температуры наружного воздуха. С другой стороны, реализация достаточно надёжного и универсального подхода, в рамках которого в качестве управляющих параметров используются актуальные значения температуры поверхности интерьера в критических точках и их производные по времени, представляется, по крайней мере, сложной, а, скорее всего - просто невозможной из-за технических проблем, связанных с надёжным мониторингом температуры в критических точках поверхности интерьера Исаакиевского собора. С учётом всех этих обстоятельств, простой подход, базирующийся на мониторинге температуры наружного воздуха, представляется более привлекательным, и именно он принят за основу.

Для того чтобы оценить скорость изменения температуры поверхности интерьера при нестационарных условиях был выполнен ряд модельных нестационарных расчётов со скачкообразным изменении температуры на величину от 5 °С до 10 °С и с её колебаниями с амплитудой 10 °С.

На основе анализа полученных результатов был сделан вывод о том, что, по крайней мере, на отрезках времени порядка одних суток, температура поверхности интерьера Исаакиевского собора слабо реагирует на резкие (скачкообразные) изменения температуры наружного воздуха на величину 5 °С–10 °С. Данный вывод означает, что корректировка расхода воздуха через угловые ТУ собора в соответствии с текущей температурой наружного воздуха при таких масштабах её изменения может производиться достаточно редко (один или два раза в сутки).

Для окончательной проверки работоспособности сформулированного в предыдущем разделе данной главы алгоритма управления расходом воздуха тепловоздушных установок при переменных

погодных условиях были выполнен нестационарный расчёт теплового состояния интерьера собора при изменении температуры окружающего воздуха, имевшем место в январе 2008 г. (см. рис. 21). Отметим, что этот отрезок времени является достаточно представительным, так как на его протяжении наблюдаются все основные характерные особенности изменения температуры в Санкт-Петербурге, а именно, наличие периодов резкого падения, повышения и относительно стабильной температуры. В расчёте коррекция расхода воздуха тепловоздушных установок в соответствии с разработанным алгоритмом проводилась один раз в сутки.

Результаты расчёта в виде диаграмм температуры в критических точках 1–18 в моменты времени $t = 0.5$ суток, сутки, 3 суток, 4.5 суток, 5.5 суток, 7 суток после начала численного эксперимента представлены на рис. 22. Они свидетельствуют о том, что сформулированное предположение о возможности коррекции расходов тёплого воздуха через ТУ в соответствии с температурой окружающего воздуха один раз в сутки, является вполне правомерным.

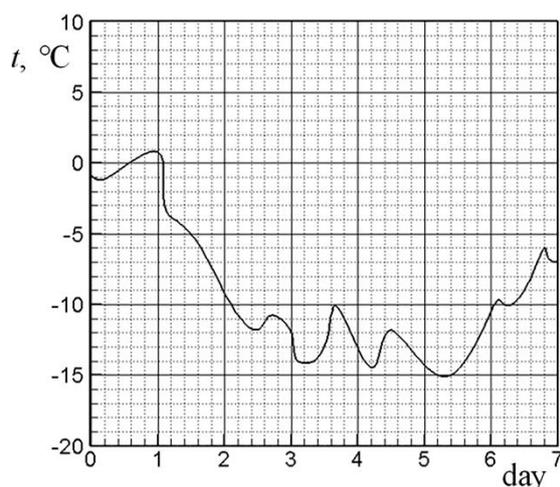


Рисунок 21. Изменение температуры воздуха в Санкт-Петербурге в январе 2008 года.

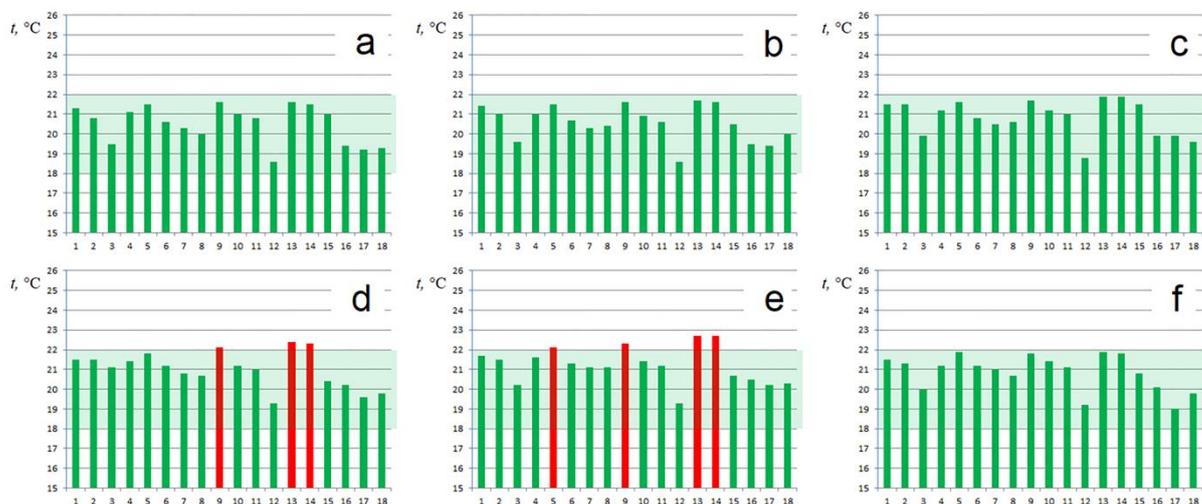


Рисунок 22. Диаграммы температуры поверхности в «критических» точках 1–18 в различные моменты времени при коррекции расхода один раз в сутки. А) – через 0.5 суток; В) – через 1 сутки; С) – через 3 суток; D) – через 4.5 суток; Е) – через 5.5 суток; F) – через 7 суток после начала численного эксперимента.

Как видно из рис. 22, несмотря на существенные изменения температуры наружного воздуха (от 1 °C до -15 °C), температура поверхности интерьера собора на всем рассматриваемом отрезке времени практически не выходит за пределы нормативного диапазона 18–22 °C. Небольшой перегрев (около 0.5 °C) наблюдается лишь в нескольких точках, расположенных под потолком у барабана собора (точки 13 и 14 см. рис. 22 d, e) и на потолке у северной и южной стен (точки 5 и 9 см. рис. 22 e). Этот перегрев возникает при быстром росте температуры окружающего воздуха (через 4.5 и 5.5 суток) и быстро устраняется, благодаря коррекции расхода воздуха тепловых установок (см. Рис. 29 f).

5. Заключение

В результате проведённых исследований были сформулированы технические предложения по созданию новой системы ОВК Исаакиевского собора, которая обеспечивает выполнение современных жёстких требований, предъявляемых к параметрам микроклимата в музеях-памятниках. Эти предложения послужили основой для разработки технического задания на проектирование такой системы. Реконструкция системы ОВК в Исаакиевском соборе была проведена в течение 2010 г. – 2016 г. Она включала в себя, в том числе, работы по утеплению пола чердачного помещения. В подвальном помещении собора установили новые тепловоздушные установки. В помещении собора установлено около 30 датчиков, которые измеряют температуры воздуха и поверхности художественного интерьера. Подробнее о технических аспектах реконструкции системы отопления Исаакиевского собора см. работу [16].

К настоящему времени имеется четырёхлетний опыт эксплуатации новой системы ОВК Исаакиевского собора. Не выявлено никаких проблем поддержания с её помощью температуры поверхности художественного интерьера в заданном нормативном диапазоне температур.

Литература

1. Tian W, Han X, Zuo W, Sohn M (2018). Building Energy Simulation Coupled with CFD for Indoor Environment: A Critical Review and Recent Applications. *Energy and Buildings*, 165: 184–199.
2. Yu Y, Megri A, Jiang S (2019). A review of the development of airflow models used in building load calculation and energy simulation. *Building Simulation*, 12: 347–363.
3. Corgnati S, Perino M (2013). CFD application to optimise the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 14(1): 62–69.
4. Bonacina C, Baggio P, Cappelletti F, Romagnoni P, Stevan A (2015). The Scrovegni Chapel: The results of over 20 years of indoor climate monitoring. *Energy and Buildings*, 95: 144–152.
5. Grabon M, Anderson J, Bushnell P, Calvo A, Chadwick W (2015). The Sistine chapel: New HVAC system for cultural preservation. *ASHRAE Journal*, 57(6): 20–34.
6. Lee T.-W, Singh H, Lee J, Jeong H-M, Sturm D (2011). Computational simulations and optimization of flow and temperature distributions in a large-scale power plant building. *Building Simulation*, 4: 341–349.
7. Son C, Ivanov N, Smirnov E, Telnov D (2019). Numerical simulation of toilet system air flow characteristics in the International Space Station. Paper presented at the 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts, USA.
8. Grau-Bové J, Mazzei L, Strlic M, Cassar M (2019). Fluid simulations in heritage science. *Heritage Science*, 7(16): 1–12.
9. Coolit (2019). Coolit v.19 ups productivity with improved user interface and functionality. Daat Research Corp. USA. Available at <https://www.daat.com/papers/Coolit19.php>. Accessed 22 July 2020.
10. Nehamkina O, Niculin D, Strelets M (1989). Hierarchy of models of natural thermal-convection of an ideal-gas. *High Temperature*, 27(6): 883–892.
11. Gulyaev A, Kozlov V, Secundov (1993). A Universal One-Equation Model for Turbulent Viscosity. *Fluid Dynamics*, 4: 485–494.
12. Zajkov L, Strelets M, Shur M (1996a). Comparison between one- and two-equation differential turbulence models in application to separated and attached flows. Flow in a channel with a backward facing step. *High Temperature*, 34(5): 713–725.
13. Zajkov L, Strelets M, Shur M (1996b). A comparison of the capabilities of one- and two-equation differential models of turbulence in application to separated and attached flows in a channel with forward-facing step. *High Temperature*, 34(6): 882–888.
14. Bassina I, Lomakin S, Niculin D, Strelets M, Shur M (1998). Assessment of applicability of modern models of turbulence for calculation of natural-convection flows and heat transfer. *High Temperature*, 36(2): 230–238.
15. ASHRAE (2001). Handbook–Fundamentals. Atlanta.
16. Argannikov R (2016). Reconstruction of HVAC system of St. Isaac's Cathedral. *Sustainable building technologies* [e-magazine], 2: 46–49. (in Russian). Available at http://zvt.abok.ru/articles/317/Rekonstruktsiya_sistemi_otopleniya_Isaakievskogo_sobora. Accessed 22 July 2020.