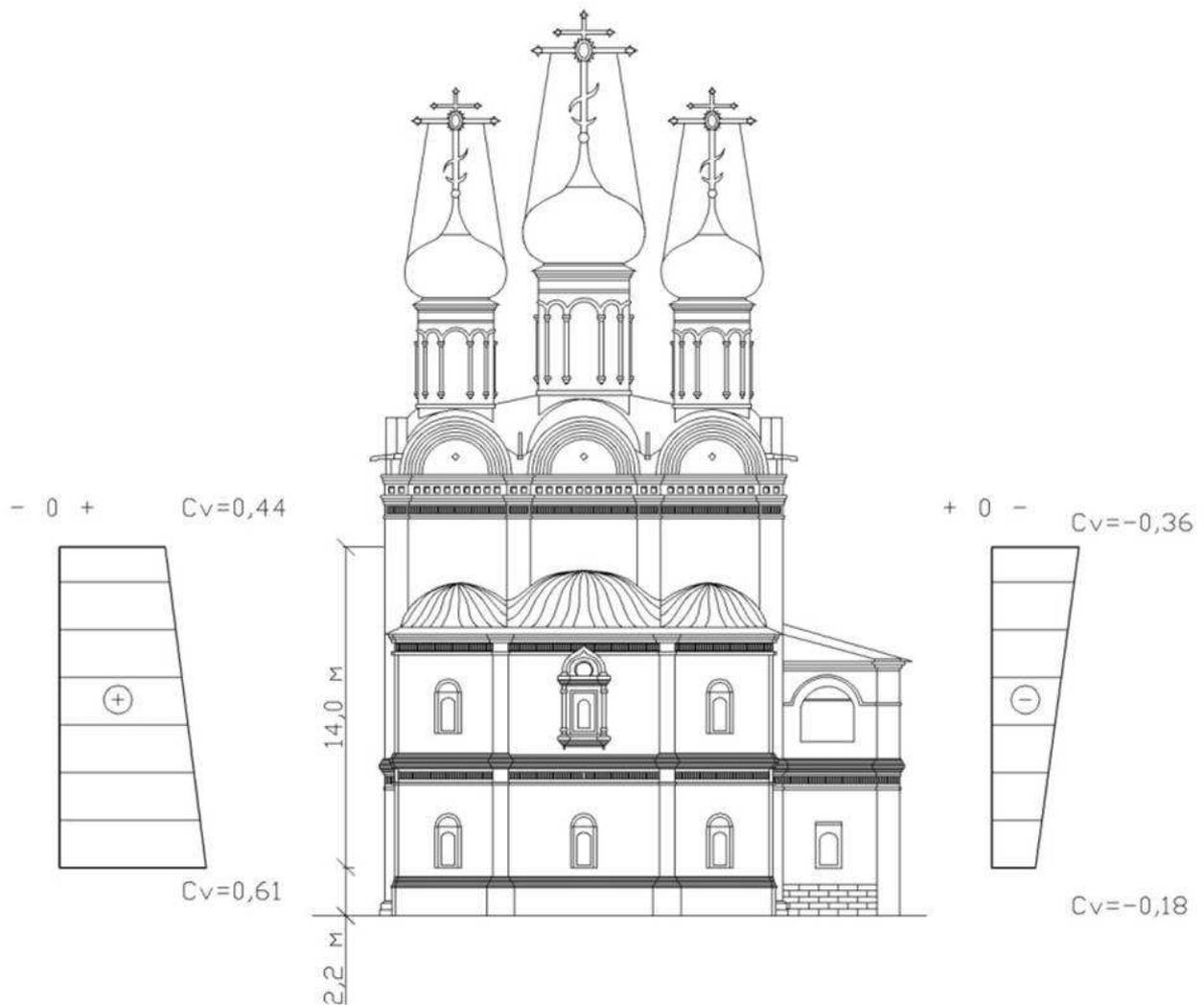


А. Г. Кочев, М. М. Соколов

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ АЭРОДИНАМИКИ НА МИКРОКЛИМАТ ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМОВ



Нижний Новгород  
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

А. Г. Кочев, М. М. Соколов

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ АЭРОДИНАМИКИ НА МИКРОКЛИМАТ  
ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМОВ

*Научная монография*

Нижний Новгород  
ННГАСУ  
2017

*Печатается в авторской редакции*

ББК 38.762.2  
К 55  
С 59  
УДК 697.922

Рецензенты:

*Гагарин В.Г.* – доктор технических наук, профессор, член-корр. РААСН, главный научный сотрудник  
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики» (НИИСФ РААСН)  
*Хаванов П.А.* – доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции  
НИУ МГСУ

Кочев А.Г. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов. [Текст]: научная монография / А.Г. Кочев, М.М. Соколов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. – 188с. ISBN 978-5-528-00192-0

Приводится анализ современных литературных источников, посвященных созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах. Рассматривается физико-математическое описание процесса естественной конвекции в молельном зале храма. Отмечаются особенности проводимых в работе экспериментальных исследований. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований в области внешней и внутренней аэродинамики: испытание в аэродинамической трубе моделей храмов; замеры температурных и скоростных полей на натурном объекте; замеры расхода свечей. Приводится инженерная методика расчета систем аэрации, и даются соответствующие рекомендации.

Монография адресована научным работникам в области создания и поддержания требуемых параметров микроклимата в зданиях, аспирантам, магистрантам и студентам инженерных университетов. Отдельные разделы могут заинтересовать специалистов в области архитектуры и строительства.

Рис. 24, табл. 8, библиогр. назв. 231

ББК 38.762.2

ISBN 978-5-528-00192-0

© Кочев А.Г. Соколов М.М., 2017  
© ННГАСУ 2017

## Содержание

Перечень условных обозначений .....	5
Введение.....	8
Глава 1. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах .....	12
1.1. Обзор работ по аэродинамическим исследованиям, теплообмену и теплопередаче в зданиях и сооружениях .....	12
1.2. Теоретические и экспериментальные основы аэродинамических исследований.....	20
1.3. Анализ нормативной документации по православным храмам.....	25
1.4. Теоретическое обоснование выбора исследуемых православных храмов.....	30
Выводы по первой главе.....	39
Глава 2. Физико-математическая модель аэродинамических процессов.....	40
2.1. Общие сведения о конвективном теплообмене .....	40
2.2. Особенности физико-математического моделирования православных храмов.....	41
2.3. Теплоотдача при свободном движении на вертикальных стенах православных храмов.....	44
2.4. Теплоотдача при свободном движении вдоль оконных проемов православных храмов.....	52
2.5. Альтернативные решения задач на вдув. ....	59
Выводы по второй главе.....	64
Глава 3. Экспериментальные исследования аэродинамики православных храмов.....	65
3.1. Критерии подобия .....	65

3.2. Планирование эксперимента.....	69
3.3. Методика экспериментальных исследований.....	77
3.4 Расположение характерных точек исследования в моделях православных храмов.....	81
3.5. Исследование полей температуры и скорости в помещениях православных храмов.....	89
3.7. Определение расхода свечей.....	91
3.8. Оценка точности измерений.....	96
Выводы по третьей главе.....	97
Глава 4. Инженерная методика расчетов систем аэрации в православных храмах.....	99
4.2. Определение выделяющейся теплоты, необходимой для удаления системами аэрации.....	103
4.3. Расчет аэрации с учетом теплопотерь.....	104
Выводы по четвертой главе.....	107
Заключение.....	108
Библиографический список.....	111
Приложения.....	135
Приложение А. Результаты исследований температурных и скоростных полей в молельном зале православных храмов.....	136
Приложение Б. Значения аэродинамических коэффициентов для исследованных православных храмов.....	151

**Перечень условных обозначений**

$a$	- коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$c_p$	- удельная теплоёмкость при постоянном давлении, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;
$c_v$	- аэродинамический коэффициент;
$g$	- ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$ ;
$G$	- массовый расход, $\text{кг}/\text{ч}$ ;
$G_v$	- весовой расход, $\text{кг}/\text{ч}$ ;
$G_o$	- объёмный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
$H, h$	- высота, шаг конечно-разностной сетки, $\text{м}$ ;
$L, l$	- длина, путь, характерный размер, $\text{м}$ ;
$M, m$	- масса, $\text{кг}$ ;
$p$	- давление, $\text{Па}$ ;
$q$	- удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
$Q$	- количество теплоты, передаваемой или выделяемой в единицу времени, $\text{Вт}$ ;
$R$	- удельная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;
$t$	- температура, $^\circ\text{C}$ ;
$T$	- абсолютная температура, $^\circ\text{K}$
$U$	- внутренняя энергия, $\text{кДж}$ ;
$V, v$	- объём, скорость, $\text{м}^3$ , $\text{м}/\text{с}$ ;
$W$	- кинетическая энергия, $\text{кДж}$ ;
$x$	- расстояние по оси $x$ , $\text{м}$ ;
$y$	- расстояние по оси $y$ , $\text{м}$ ;
$\alpha$	- коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ ;

$\beta$	- термический коэффициент объёмного расширения, $1/^\circ\text{C}$ ;
$\gamma$	- удельный вес, $\text{H}/\text{м}^3$ ;
$\Delta$	- разность значений, шаг вдоль оси, м;
$\Delta$	- оператор Лапласа
$\delta$	- толщина динамического пограничного слоя, м;
$\delta_t$	- толщина теплового пограничного слоя, м;
$\vartheta$	- разность температур, $^\circ\text{C}$ ;
$\Theta$	- безразмерная температура, относительный температурный напор;
$\lambda$	- коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
$\mu$	- коэффициент динамической вязкости, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м})$ ;
$\nu$	- коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$\rho$	- плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
$\sigma$	- площадь сечения, $\text{м}^2$ ;
$\tau$	- время, с, ч;
$\omega$	- коэффициент расхода;
$\nabla$	- оператор Набла (Гамильтона)

### Критерии подобия

$Eu = \Delta P / (\nu^2 \cdot \rho)$	- число Эйлера;
$Fo = a \cdot \tau / l^2$	- число Фурье;
$Gr = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu^2$	- число Грасгофа;
$Nu = \alpha \cdot l / \lambda$	- число Нуссельта;
$Pe = \nu \cdot l / a$	- число Пекле;
$Pr = \nu / a$	- число Прандтля;
$Re = \nu \cdot l / \nu$	- число Рейнольдса;
$Ri = (\Delta \rho / \rho) \cdot (g \cdot l / \nu^2)$	- число Ричардсона;

$St = \alpha / (v \cdot c_p \cdot \rho)$  - число Стантона.

### Индексы

- a - атмосферное или гидростатическое значение величины;
- абс - абсолютное значение величины;
- в - значение величины внутри помещения;
- выт - значение величины на вытяжке;
- изб - избыточное значение величины;
- н - значение величины снаружи помещения;
- пр - значение величины на притоке;
- ср - среднее значение величины;
- усл - условное значение величины;
- ас - значение величины на адиабатической стенке;
- max - максимальное значение величины;
- s - значение величины на поверхности;
- t - тепловой;
- x - значение величины в точке с координатой x, проекция на ось x;
- y - значение величины в точке с координатой y, проекция на ось y;
- $\delta$  - значение величины на границе пограничного слоя;
- 0 - значение величины в исходной точке;
- $\infty$  - значение величины на большом расстоянии от тела;
- - среднее значение величины;
- ' - пульсация;
- " - интегральное значение величины.

## Введение

От простейшего клетского храма  
До шедевра – ансамбля в Кижях -  
Историческая панорама;  
Эклектический альманах.

Но любой: что «корабль», что барочный;  
Что шатровый, что ярусный храм -  
Символ веры людской непорочный,  
Историческим дань временам.

Больше тысячи лет незабвенных,  
Восхищает церковная статья,  
И способность гигантов смиренных,  
Небеса куполами достать.

Православные храмы – это уникальные сооружения и памятники архитектуры. Каждая деталь храма имеет глубокий смысл и значение. Однако ввиду разрушительной деятельности Советской власти далеко не все храмы сохранились до наших дней. К примеру, в Нижнем Новгороде после революции 1917 сохранилось около 40 храмов лишь потому, что с них были сняты купола с крестами, а их помещения использовались не по назначению, например, как складские. Это приводило к нарушению микроклимата в помещениях, и, как следствие, порче внутренней отделки, исторических ценностей, а также частичному или полному разрушению самих сооружений.

В настоящее время, когда происходит реконструкция и строительство храмов, требуется уделить особое внимание обеспечению требуемых параметров микроклимата культовых сооружений. Для обеспечения в православных храмах комфортных условий, снижения теплопотерь и повышения продолжи-

тельности эксплуатации ограждающих конструкций здания необходимо разрабатывать системы отопления и вентиляции. Однако, в силу эстетических, технических и экономических причин устройство приточно-вытяжной механической вентиляции в помещениях православных храмов не всегда представляется возможным. Обеспечения требуемого воздухообмена в помещениях можно добиться с помощью аэрации. Она требует самых минимальных эксплуатационных затрат и является относительно недорогой при монтаже. Для грамотного расчета аэрации православных храмов необходимо знание внешних аэродинамических характеристик церквей, что будет учитываться при расчете ветровых нагрузок на сооружение.

Цель, с которой проводились исследования, описанные в данной работе - разработка теоретических основ и практических рекомендаций по созданию и поддержанию микроклиматических условий в исследуемых православных храмах, зависящих от внутренних и наружных климатических воздействий.

Для того чтобы данная цель была достигнута в работе решались следующие задачи:

Изучение архитектурных особенностей православных храмов, функциональных особенностей помещений и обзор научной литературы, где приводятся результаты исследований теплотехнических и аэродинамических характеристик для различных типов сооружений.

На основе теоретических исследований определение основных теплотехнических и аэродинамических характеристик, определяющих микроклиматические условия для различных видов храмов и их элементов.

Исследование наружных аэродинамических характеристик храмов и элементов для обеспечения: требуемых параметров микроклимата вызывающих минимальные температурные деформационные напряжения конструкций, сохранности фресок, станковой живописи, художественной росписи и предметов культовых обрядов.

Проведение экспериментальных исследований для определения требуемых воздухообменов на основе полученных теплотехнических и аэродинамических характеристик ограждающих конструкций храмовых сооружений.

Проведение сравнительного анализа теоретических и экспериментальных исследований и разработка методики инженерных расчетов и практические рекомендации по обеспечению требуемых режимов работы систем кондиционирования микроклимата храмов, с учётом функциональной особенности помещений.

Для удобства восприятия материала вся работа разделена на соответствующие главы.

В первой главе проводится аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта по аэродинамике, вентиляции, отоплению, тепло- и массообмену в зданиях различного назначения. Особое внимание при этом уделено современному состоянию рассматриваемых задач. Приводится анализ нормативной документации по православным храмам.

Существенный вклад в разработку и совершенствование теории и практики аэродинамических исследований, а также теплового и воздушного режимов гражданских и промышленных зданий внесли отечественные и зарубежные ученые: Н. Е. Жуковский, Л.И. Седов, Л.Г. Лойцянский, Л. Прандтль, О. Титтенс, А.В. Лыков, В.Н. Богословский, Й. Джалурии, Б. Гебхарт, Д.Б. Сполдинг, О. Рейнольдс, С.В. Патанкар, Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк, В.И. Полежаев, А.Д. Госмен, Р. Темам, А.А. Абрашкина, Е.И. Якубович, Н.Я. Фабрикант, Р. Пэнкхерст, Д. Холдер, Н.С. Аржаников, Н.Ф. Краснов, Ф.В. Шмитц., А.К. Мартынов, В.Н. Талиев, Э.И. Реттер, С.И. Стриженов, В.В. Батурин, В.М. Эльтерман, И. А. Шепелев, Ю.А. Табунщиков, А.М. Гримитлин, В.Г.Гагарин.

При изучении архитектуры православных храмов основными источниками служили работы И. Грабаря, Г.В. Барановского, Н.Ф. Филатова. На основании полученных данных о видах и стилях православных храмов в первой главе приводится теоретическое обоснование выбора исследуемых культовых сооружений.

Обзор научно-технической литературы показал, что наибольшее внимание при изучении процессов осушения толщи строительной конструкции, тепло- и массообмена на внутренней поверхности наружных ограждений уделено промышленным зданиям и некоторым типам общественных, по ряду характеристик отличающихся от уникальных сооружений.

В нормативной документации не приводятся значения аэродинамических коэффициентов для различных типов храмов, а также методика и примеры расчета по организации требуемого воздухообмена в помещениях сооружений.

Во второй главе приведены краткие сведения о тепломассообменных процессах в православных храмах. Также рассматривается физико-математическая модель движения восходящего конвективного потока вдоль внутренней поверхности наружного ограждения в православных храмах.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования, которые состоят из следующих этапов:

- планирование эксперимента;
- определение значений аэродинамических коэффициентов у четырех выбранных православных храмов в характерных точках расположения приточных и вытяжных фрамуг;
- определение значений скоростных и температурных полей на внутренней поверхности ограждающих конструкций православного храма;
- определение расхода свечей;

В четвёртой главе приведена инженерная методика расчёта приточных и вытяжных фрамуг в православных храмах с учетом аэродинамических коэффициентов и прочих факторов, влияющих на величину воздухообмена (количество прихожан, тепловыделения от свечей и лампад и т.д.).

## **Глава 1. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в православных храмах**

### **1.1. Обзор работ по аэродинамическим исследованиям, теплообмену и теплопередаче в зданиях и сооружениях**

Аэродинамика (происходит от греческих слов «воздух» и «сила») – это наука, изучающая законы движения воздуха в зависимости от действующих на нее сил и на их основе устанавливает частные законы взаимодействия между воздухом и движущимся в нем твердым телом [100]. Однако, данное определение, учитывая необходимость движения твердого тела, применимо в большей степени для авиации и космонавтики, в то время как для зданий и сооружений можно охарактеризовать аэродинамику, как науку изучающую процессы обтекания твердых тел жидкостями или газами.

В своей монографии «Экспериментальная аэродинамика» [124] А.К. Мартынов характеризует аэродинамику как часть гидромеханики или механики нетвердых тел. Он также подразделяет аэродинамику на:

- теоретическую, которая является в основном прикладной математикой и механикой;
- экспериментальную, занимающуюся рассмотрением самого явления и обобщающую результаты опытов;
- аэродинамику самолета, в которой рассматриваются полет различных летательных аппаратов и разрабатываются методы их аэродинамического расчета;
- промышленную аэродинамику, в которой рассматриваются вопросы применения аэродинамики в народном хозяйстве (частным случаем может служить аэродинамика зданий и сооружений)

Гидромеханика является разделом более общей науки – механики сплошных сред, и подразделяется на гидростатику и гидродинамику.

Основоположителем современных аэро- и гидромеханики можно по праву считать выдающегося русского ученого Николая Егоровича Жуковского, которому принадлежит знаменитое высказывание, - «человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума». Под его руководством была создана одна из первых в мире аэродинамических труб в 1902 г., основан первый в Европе аэродинамический институт (современный ЦАГИ) в 1904 г., организована аэродинамическая лаборатория в Московском техническом училище в 1910 г. [224].

Гидро- и газодинамика обязаны своим появлением работам выдающегося ученого и педагога Леонида Ивановича Седова. Итог его многолетней научной и преподавательской деятельности был воплощен в двухтомнике «Механика сплошных сред» [158,159]. Структура преподносимой информации в этих работах выстроена таким образом, чтобы обеспечить для читателя при минимуме фактической информации и ограничиваясь простыми примерами, базу для детального понимания сущности основ механики сплошной среды и главных известных эффектов, возникающих при движении сплошных сред. Знакомство с этими трудами необходимо для глубокого понимания более поздних работ в изучаемой области. Труды Лойцянского Л.Г. [114,115], в отличие от работ Седова Л.И., усложнены математическими зависимостями для нахождения различных параметров, необходимых для инженерных расчетов. Это существенно ограничивает возможность использования этих работ специалистами. Однако работы Лойцянского Л.Г., являются источниками основных закономерностей в движении жидкостей и газов, и становятся более доступными для понимания, при их совместном изучении с VI томом «Гидродинамики» 10 томного издания «Теоретическая физика» Л.Е. Ландау и Е.М. Лифшица [111]. Эти работы дополняют друг друга.

Гидромеханика, как наука, в отличие от механики твердого тела исследует среду с очень слабыми связями между молекулами, что позволяет молекулам жидкостей и в особенности газов перемещаться в любом направлении, вызывая беспорядочное молекулярное движение. Для того, чтобы избежать этого суще-

ственного усложнения при освоении материала Жан Лерон Д'Аламбер и Леонард Эйлер предложили отказаться от рассмотрения молекулярного строения вещества, а изучать жидкости и газы, не принимая во внимание отдельные молекулы и пустоты между ними, считая эти среды сплошными, непрерывно заполняющими пространство. Благодаря этому допущению все механические характеристики жидкостей и газов, такие как температура или давление, можно представить как непрерывные функции координат точки и времени, что позволяет для решения различных задач по гидроаэромеханике применять математический анализ [188]. Стоит также отметить, что воздух в данных науках считается газообразной жидкостью [153], поэтому рассматриваемые закономерности для жидкости будут справедливы и для воздушных потоков.

Говоря о гидромеханике и гидродинамике, стоит также отметить немецкого физика Людвига Прандтля, внесшего огромный вклад в различные области механики жидкостей, аэродинамики, механики упругого тела и разработавшего теорию пограничного слоя. Он впервые описал теорию пограничного слоя и его влияние на лобовое сопротивление и на срыв потока. Приближенная теория пограничного слоя широко используется и в настоящее время. [59, 63, 64, 65, 68, 97, 98, 110, 112, 145, 148, 160, 177, 196, 197]

Например, уравнение Навье-Стокса, которое в векторном виде записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} &= -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \\ \nabla \cdot \vec{v} &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\nabla$  — оператор набла,  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $t$  — время,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\rho$  — плотность,  $p$  — давление,  $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$  — векторное поле скоростей,  $\vec{f}$  — векторное поле массовых сил.

сводится к более простому виду - к уравнениям теории пограничного слоя (уравнения Прандтля), в которых давление не изменяется по нормали к обтекаемой поверхности, а изменение давления вдоль поверхности определяется течением идеальной жидкости вне пограничного слоя. В простейшем случае

двумерного установившегося течения вдоль плоского контура уравнения Прандтля имеют вид:

$$\begin{aligned} v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} &= U \frac{\partial U}{\partial x_1} + \nu \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2}, \\ \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} &= 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь  $x_1$ ,  $x_2$  и  $v_1$ ,  $v_2$  - координаты и, соответственно, компоненты скорости в пограничном слое вдоль поверхности и по нормали к ней,  $U$  - скорость на внешней границе слоя.

Также, продолжая исследование, начатое Фредериком Ланчестером в 1902—1907 годах, Прандтль объединил свои усилия с физиком Альбертом Берцем и инженером Михаэлем Мунком для исследования подъемной силы реального аэродинамического крыла, используя математический аппарат. Результаты исследования опубликованы в 1918—1918 годах и теперь они известны как «теория крыла Ланчестера-Прандтля» [145, 196, 197].

В 1908 году Прандтль и его студент Теодор Майер впервые предложили теорию сверхзвуковой ударной волны. На основе течения Прандтля — Майера в Гёттингене в 1909 году построена первая в мире сверхзвуковая аэродинамическая труба.

Одна из главных работ Л. Прандтля [145] – фундаментальный труд, в котором изложены вопросы гидромеханики, необходимые для идей теории воздухоплавания и гидравлики. Первое издание, появившееся в 1942 году, автор назвал «Путеводителем по аэродинамике», подразумевая в названии то, что данная книга позволит определить самый быстрый путь в освоении аэродинамики. Всю информацию Л. Прандтль передает в работе двумя различными по величине шрифтами, большим шрифтом он выделяет основную информацию, которой рекомендуется ограничиться во время первого прочтения, мелким шрифтом – более трудную информацию, для изучения которой потребуются знания основ предмета. Такой подход значительно упрощает восприятие необходимых

данных, которые потребуются для проведения исследований. Приводимые в работе сведения об особенностях турбулентного движения и основные уравнения движения вязкой жидкости в пограничном слое получили свое развитие, как при исследовании аэродинамики летательных аппаратов, так и зданий.

Стоит также уделить внимание работе О. Титъенса, ученика Л. Прандтля, который по лекциям своего учителя составил двухтомное издание, посвященное гидро- и аэромеханике [196,197]. Под руководством своего наставника, О. Титъенсу удалось, рассмотрев области, выходящие за пределы лекционного курса Л. Прандтля, не только переработать огромный материал, но и добавить в него собственные исследования (в большей степени это касается второго тома). Однако, это вызвало некоторое несоответствие материала, рассматриваемого в книгах, в связи с разбиением на тома. Сам Людвиг Прандтль отмечал, что первый курс его лекций «Гидродинамика и аэродинамика» содержит больше математических выражений, в то время как второй курс лекций «Аэромеханика» ориентирован на практическое применение [196], тогда как в двухтомнике такая постановка вопроса не всегда соблюдается (часть глав из первого тома по мнению Л. Прандтля должна быть во втором томе, и наоборот). Но этот факт несколько не умоляет важнейшей информации, которая собрана в этом фундаментальном труде.

При ознакомлении с теоретической базой для изучения аэрации, как разновидности систем вентиляции, стоит учитывать не только действие ветровой нагрузки, величина которой определяется при проведении аэродинамических испытаний, но и внутреннюю аэродинамику, которая будет зависеть от мощности систем отопления, количества прихожан, и для описания которой, следует обратить внимание на такие дисциплины как теплопередача и теплообмен [188].

Работа Лыкова А.В. [116] представляет собой систематизированный справочный материал по проблемам теплообмена, содержащий помимо основного обзора знаний по теплообмену критический анализ, в котором приводится аналитическое описание процессов переноса в разнообразных фор-

мах и показаны новые, на момент написания труда, пути их развития. Материал, приводимый в книге, содержит богатую теоретическую и практическую составляющие, однако при применении его в инженерной практике некоторые математические зависимости могут вызвать определенные сложности. Например, задача, описывающая движение восходящего ламинарного конвективного потока вдоль плоской пластины, необходимая для математического описания процессов естественной конвекции, более доступно изложена в [78]. Хорошая математическая подготовка также потребуется для освоения книги этого же автора [117], целью которой является решение задач нестационарного теплообмена в инженерной практике. Рассматриваемые Лыковым А.В. задачи расположены по степени трудности так, чтобы каждая последующая была развитием предыдущей. В работе приводятся подробные решения с конкретными расчетами и использованием графических зависимостей. Особый интерес в данной литературе представляют задачи на вдув.

Важные сведения, при изучении тепло- и массообменных процессов, можно получить из работы В.Н. Богословского [12]. В книге подробно рассматриваются: особенности теплового режима помещений для различных периодов года, стационарная и нестационарная теплопередачи через ограждающие конструкции, воздушный режим здания и т.д.

Наиболее подробным источником информации, охватывающим основные случаи естественно-конвективных течений является работа Й. Джалурии [64]. В работе приводится качественное описание естественной конвекции, рассматривается вывод приближенных уравнений естественной конвекции из уравнений Навье-Стокса и методы их решения. Также рассматривается решение внешних задач тепловой гравитационной конвекции (конвекция около твердых поверхностей, переход из ламинарного режима в турбулентный и т.д.). Автор демонстрирует не только постановку задачи и различные методы её решения, но и затрагивает физические особенности изучаемых процессов, приводя многочисленные примеры. Также подробно рассматривается эксперимент по визуализации течения и экспериментальное оборудование. Работа Й. Джалурии

успешно сочетает в себе подробный литературный обзор по отдельным вопросам, опыт экспериментальных исследований автора, сильную теоретическую и практическую базу, и важные справочные сведения.

Впоследствии Й. Джалурия совместно с Б. Гебхартом, Р. Махаджаном и Б. Саммакия создает труд [155] в двух томах, охватывающий самые различные направления исследований свободной конвекции. В источнике рассмотрены приближения уравнений пограничного слоя, а также задачи, затрагивающие описание естественной и смешанной конвекции. Важная роль отводится особенностям турбулентных течений.

Создавая свой труд Сполдинг Д.Б. [183] преследовал цель обеспечить рядового инженера, без глубоких познаний в смежных науках и высшей математики, необходимым материалом для проведения достаточно точных расчетов важных процессов тепло- и массопереноса. Всю сложную проблему тепло и массообмена автор рассматривает в её многообразном приложении с единой позиции – интенсивность массообмена определяется одной величиной на основе закона сохранения массы вещества. Следует также отметить, что в базисе расчетной схемы процесса массообмена принята модель потока Рейнольдса «Reynolds Flow», основанная на фундаментальных теоретических исследованиях Осборна Рейнольдса [183] в области поиска связи гидродинамических характеристик течений с коэффициентами конвективного теплообмена котельных жаровых труб. Особенности модели описаны во второй главе, как и сведения, что сам рейнольдсов поток фиктивен и его нельзя обнаружить в пограничном слое методами гидродинамики.

Однако подход Сполдинга Д.Б., несмотря на свою простоту, универсальность и доступность для инженера, из-за его отказа от аппарата математической физики и численного анализа был несколько ограничен в решении современных задач совместного тепло- и массообмена. Ученику Сполдинга Д.Б. Патанкару С.В., стремящемуся создать универсальный метод расчета обширного круга задач тепло- и массообмена, который бы эффективно применяли как инженеры, так и научные работники, удалось совместно со своим учителем вопло-

тить свои идеи в жизнь в работе [146], где рассмотрены как математический аспект, так и физическая сторона вопроса. Патанкар С. В. впоследствии создает работу [141], в которой рассматривает только свой собственный метод численного решения задач газодинамики и тепломассообмена. Математическому моделированию тепло- и массообменных процессов посвящены так же работы Полежаева В.И. [127], Госмена А.Д. [51], Темам Р. [130], Абрашкина А.А. и Якубовича Е.И. [1]

Переработанная монография Э.Р. Эккерта «Введение в теорию тепло- и массообмена» с учетом обобщения последних работ (на момент создания книги) по теории пограничного слоя в процессах тепло- и массообмена и участием Р.М. Дрейка [222] является важным звеном в цепи понимания физических основ процессов тепломассообмена. В работе систематизированы основные вопросы теории теплопроводности, конвективного и лучистого теплообмена, вопросы массообмена в процессах пористого охлаждения и испарения. С точки зрения исследования внутренней аэродинамики в православных храмах, задачи на пористое охлаждение, которые могут применяться как альтернативные задачам на вдув представляют особый интерес.

Многообразие литературных источников и обилие информации по таким фундаментальным наукам, как тепломассообмен, гидро- и газодинамика, механика сплошных сред, которые являются смежными дисциплинами для аэродинамики, как науки подчеркивает многогранность и сложность проводимых исследований. Некоторые авторы попытались максимально упростить преподносимый материал для эффективного восприятия и проведения инженерных расчетов, однако это существенно ограничило область применения их работ. [183]

Однако, если определить область, для которой были проведены все рассмотренные в трудах исследования на примере зданий и сооружений, то все вышеперечисленное будет относиться не к православным храмам, а к промышленным и гражданским зданиям.

## **1.2. Теоретические и экспериментальные основы аэродинамических исследований**

При изучении теоретических и экспериментальных основ аэродинамики для зданий и сооружений, следует учесть первоначальную направленность науки на авиационную технику.

Для освоения основных законов аэродинамики, общих законов сопротивления среды, теории пограничного слоя и т.д. следует обратиться к работе Н. Я. Фабриканта [199]. Несмотря на то, что в данном курсе рассматривается применение аэродинамики главным образом к вопросам авиации, материал может послужить хорошей основой для проводимого исследования. Всю монографию автор разделяет на два больших раздела. Первые три главы: «Введение», «Основные законы аэродинамики», «Основные законы сопротивления среды» - дают общее знакомство с базисом аэродинамики и представляют собой минимально необходимую, но логически завершенную часть курса с простым и доступным математическим аппаратом. Оставшиеся четыре главы содержат развернутое изложение механики жидкой и газообразной среды и теории силового взаимодействия среды с движущейся в ней телом. Стоит отметить, что автор на протяжении всего курса стремится раскрыть физическую сущность рассматриваемых явлений, и лишь затем переходит к математическому анализу. Для того, чтобы обеспечить удобство применения законов аэродинамики в инженерной практике, сложные математические вычисления во всех возможных случаях доводились Н. Я. Фабрикантом до расчетных формул и графических зависимостей, например, уравнение теплового пограничного слоя.

Учитывая тот факт, что при проведении экспериментов по исследованию внешней аэродинамики в большинстве случаев используются аэродинамические трубы, стоит обратиться к работе Р. Пэнкхерста и Д. Холдера [146]. Эта книга является удачной попыткой в едином связанном изложении представить весь накопленный материал по проведению экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, по своей структуре напоминающей критическое резюме.

ме, а не учебное пособие. В работе подробно рассматриваются виды аэродинамических труб, особенности и методы визуализации движения жидкости, экспериментальное оборудование, технику проведения эксперимента, и даже альтернативные способы аэродинамических исследований – без использования аэродинамической трубы. Несмотря на то, что данная работа направлена в первую очередь на исследование аэродинамики воздушных судов, некоторые теоретические и практические сведения о проведении экспериментальных исследований в аэродинамических трубах могут быть использованы в рамках проводимого исследования.

Также, принимая во внимание особенности изучения аэродинамики зданий и сооружений, важными источниками информации могут послужить работы, рассматривающие аэродинамику воздушных судов: Н.С. Аржаникова и В.Н. Мальцева [6], Н.Ф. Краснова [100,101] совместно с В.Н. Кошевым и В.Т. Калугиным [102], Шмитца Ф.В. [217], А.К. Мартынова и Д.С. Горшенина [48], С.В. Богословского [13].

Связующим звеном между науками аэродинамикой и вентиляцией является книга В.Н. Талиева [188]. В работе приводятся «сведения по теоретической аэродинамике», где рассматриваются основные понятия, методы расчета, уравнения и прочие важные составляющие по аэродинамике, необходимые для дальнейшего понимания рассматриваемой задачи. В разделе «Применение методов аэродинамики при решении вопросов вентиляции» приводится, как терминология и теоретические основы понимания процессов, происходящих в системах вентиляции, так и практическая применимость аэродинамических зависимостей для систем вентиляции. Так же в работе описываются основы моделирования вентиляции, приводятся особенности конструкции и работы опытных установок и приборов, а также отдельно затрагивается проведение экспериментов в лабораторных условиях. Несмотря на то, что в данной книге не рассматриваются аэродинамические исследования зданий, теоретическая и практическая составляющая приводимых в ней данных весьма полезны, например,

описание опытных установок и приборов, для проведения аэродинамических исследований.

Одной из первых отечественных работ, полностью посвященных исследованию аэродинамики зданий и сооружений можно считать книгу Реттера Э.И. [153]. В этой работе после описания особенностей и характеристик воздушно-ветрового потока, теоретических и экспериментальных исследований и анализа опытов по изучению течения воздушных потоков, описанных в первой главе автор приступает к критике существующих (на момент написания) норм 1931 года. Несмотря на то, что в целом автор оценивает эти нормы как стремительный и положительный рывок в рассматриваемой области он считает необходимым произвести их корректировку. Э.И. Реттер отмечал, что неопределенности многих факторов, влияющих на ветровую нагрузку, сделали расчет формальной подстановкой числовых величин, и что их структура не отражает физической сущности явления, так как основная расчетная формула носит эмпирический характер [153]. Автор проводит обоснование новых норм, рассматривает расчет на ветровую нагрузку, и, в конечном итоге, проводит сравнительный анализ между старыми и новыми нормами. Огромное внимание уделено экспериментальной составляющей исследования внешней аэродинамики зданий и сооружений. Седьмая глава посвящена исследованию внутреннего давления в зданиях. Особую ценность представляют выводы по исследованию внутренней аэродинамики сооружений. Существенное количество сопровождающих теоретические сведения и математические расчеты графических зависимостей, иллюстраций и примеров расчетов делают книгу максимально удобной для практического применения.

При рассмотрении аэродинамики зданий и сооружений незаменимым пособием послужит еще одна работа Реттера Э.И. [151]. Наряду с общими закономерностями обтекания зданий воздушным потоком, в книге приводятся результаты аэродинамических испытаний для некоторых простых типов зданий. Следует отметить, что в данной работе рассматривается аэродинамика как отдельно стоящих промышленных зданий, так и целых микрорайонов. Автор

приводит основные методики расчета естественного воздухообмена, обращая внимание на такие важные вопросы, как:

- влияние механической вентиляции на расчет аэрации;
- влияние перегородок внутри помещения на расчет аэрации и т.д.

В работе Реттера Э.И. совместно со Стриженовым С.И. [152] рассматриваются кинематика и динамика воздушных потоков, и теория обтекания зданий. С практической точки зрения особый интерес представляют приводимые аэродинамические характеристики жилых и промышленных зданий (безфонарные, однофонарные, многофонарные и сложных профилей), расчет аэрации при ветре, аэрация промышленных площадок. Практические главы сопровождаются примерами расчетов.

В труде В.В. Батурина и В.М. Эльтермана [8] собран исчерпывающий материал по аэрации зданий. В книге рассмотрены основные положения и вопросы практического применения теории моделирования, применяемые для решения задач аэрации зданий. Представлены результаты экспериментов с моделями производственных зданий различного назначения (кузницы, корпус электролиза алюминия, корпус электролиза хлора и т.д.) и типов: однопролетные, двухпролетные и многопролетные цеха. Рассмотрены различные аэрационные устройства, такие как: незадуваемые фонари, аэрационные створки, дефлекторы и т.д. Приводятся расчеты аэрации для однопролетных, многопролетных, многоэтажных горячих цехов, в том числе и для зимнего режима.

Нагрузки на внешнюю оболочку зданий будут верны только в том случае, если внутреннее давление в здании равно атмосферному вне его, что возможно только тогда, когда здание герметически закупорено, и в момент закрытия последнего отверстия в здании течение воздуха вблизи этого отверстия отсутствовало. Стоит отметить, что на практике ни одно здание негерметично, поэтому воздушные течения вне здания будут влиять на внутреннее давление внутри здания. Даже когда все проёмы в здании закрыты, воздух будет проникать внутрь здания вследствие его пористой структуры и наличия конструктивных щелей, что будет являться причиной изменения давления внутри здания. Ветер

оказывает влияние на избыточное внутреннее давление и в том случае, когда в здании имеются открытые световые проемы. Врывающийся ветер или нагнетает воздух в строительную коробку, увеличивая тем самым барометрическое давление внутри здания по сравнению с атмосферным, или же ветер вытягивает воздух из открытого проема, уменьшенного этим самым барометрическим давлением внутри здания. Зная распределение аэродинамических сил по поверхности здания можно вычислить внутреннее давление при открытии того или иного отверстия [153].

При исследовании внутренней аэродинамики зданий и сооружений следует обратиться, в качестве одного из основных пособий, к работе И. А. Шепелева [215]. В книге успешно сочетаются теоретическая и практическая составляющие – после описания теоретических сведений и математических зависимостей приводятся примеры расчетов на рассматриваемую тему. Такая структура работы значительно упрощает применение представленных методов расчетов в инженерной практике. В первых четырех главах автор рассматривает различные типы воздушных потоков: «Воздушные потоки вблизи всасывающих отверстий», «Приточные вентиляционные струи», «Естественные конвективные потоки», «Воздушные фонтаны» - приводит их теоретическую характеристику, рассматривает по подвидам с учетом особенностей их расчетов. Пятая и шестая главы посвящены особенностям распределения воздушных потоков в помещении и аэрации промышленных зданий. Подробное рассмотрение теоретических и практических аспектов, касающихся внутренней аэродинамики делают это пособие незаменимым при проведении исследования.

Анализ литературы по аэродинамическим исследованиям показал, что данные задачи являются актуальными и в настоящее время. Несмотря на то, что аэродинамика как наука обязана своим появлением развитию технологий в области авиации и космонавтики и данным областям посвящено подавляющее большинство работ, аэродинамика зданий и сооружений сформировалась в отдельную область со своими исследователями, особенностями, законами, теоретическими и экспериментальными разработками. Однако все эксперименталь-

ные исследования проводились для зданий промышленного и гражданского назначения, с отличными от православных храмов архитектурными элементами и микроклиматом. Таким образом, аэродинамическим особенностям православных храмов в рассмотренных трудах не уделяется должного внимания.

### **1.3. Анализ нормативной документации по православным храмам**

С конца XX начала XXI веков на территории Российской Федерации отмечаются многочисленные работы по восстановлению, реконструкции и возведению новых православных храмов.

Нехватка нормативных документов в этой области была компенсирована созданием СП 31-103-99 (Свод правил по проектированию и строительству «Здания, сооружения и комплексы православных храмов») [162]. В нормативном документе рассматриваются классификации православных комплексов и требования к размещению их на территории, требования к зданиям и сооружениям богослужебного (храмы, колокольни и звонницы, крещальни и часовни) и вспомогательного назначения (просфорные, ризницы, простирочные и т.д.), к естественному и искусственному освещению, а также к шумозащите, звукоизоляции и акустике помещений, к инженерному оборудованию (отопление, вентиляция, водоснабжение, канализация, электротехнические и слаботочные устройства).

Расчетная температура воздуха для проектирования отопления и кратность обмена воздуха в основных помещениях храмов принимается по таблице 8 в этом же разделе 8, но требования приводятся лишь к четырем помещениям. Требования к системам вентиляции описаны достаточно кратко, для механической вентиляции и согласно пункту 9.14 в православных храмах при вместимости до 600 человек рассматривается возможность проектирования естественной вентиляции.

В продолжение к СП 31-103-99 [162], для более подробного раскрытия темы строительства и реконструкции православных храмов было принято ре-

шение разработать МДС 31-9.2003 [128,129,130], «Православные храмы» в трех томах.

В первом томе «Идея и образ» представлено собрание статей и заметок разных авторов о христианском и русском храмостроительстве и тенденциях его развития. Мысли о храме, его значении, архитектуре и символике, высказанные различными авторами, начиная от святоотеческого периода и заканчивая современными исследователями, собраны воедино.

С двух различных точек зрения теологии (как церковной и светской науки) освещаются особенности истории и теории храмостроительства. Материал, собранный в первом томе призван служить основой для решения задач современного храмостроительства в русле канонических традиций.

Второй том «Православные храмы и комплексы» является пособием по проектированию и строительству культовых сооружений. В нем освещены как общие принципы, так и практическая сторона храмостроительства. Во втором томе содержатся рекомендации по архитектурно-строительным и инженерным решениям, убранству храмов, развеске колоколов, порядку разработки, согласованию и составу проектной документации и другие разделы, сопровождаемые иллюстративным материалом.

В третьем томе «Примеры архитектурно-строительных решений» представлен графический и иллюстративный материал, включающий следующие разделы: русское храмостроительство XI—XX вв.; проекты и постройки православных храмов рубежа XIX—XX вв.; современные проекты и постройки деревянных и каменных храмов, часовен, храмовых комплексов; примеры решений архитектурных элементов и конструкций, внутренней декорации и убранства храмов.

Следует отметить, что данный трехтомник «Православные храмы» создавался не только для специалистов в данной области, но и для широкого круга читателей.

Ввиду рассматриваемой темы наиболее интересным является раздел 2.3 Инженерные решения. В разделе отмечается сложность принятия инженерных

решений при реконструкции православных храмов, так как необходимо обеспечить максимальную сохранность культовых сооружений, при размещении в них систем инженерного оборудования, обеспечивающих современные требования к параметрам внутренней воздушной среды. Авторы выделяют первостепенной задачей создания условий для максимальной сохранности здания храма и его внутреннего убранства.

В связи с данным требованием в документе рекомендуется следующая система организации воздухообмена: большую часть времени здание обслуживает естественная система вентиляции, а в пиковые моменты включается механическая система вентиляции.

В документе также отмечается, что в окнах светового барабана могут быть установлены клапаны-хлопушки, имеющие две жалюзийные решетки: наружную, стационарную для предохранения от проникновения в помещение наружного воздуха и внутреннюю, рабочую, выполненную из легких подвижных лепестков, которые под давлением восходящего потока внутреннего воздуха приподнимаются и выпускают излишки воздуха наружу. Живое сечение клапана рассчитывается на однократный обмен воздуха в храме при скорости движения воздуха 0,3 м/с. Эти клапаны вписывают во фрагменты оконных проемов и ориентируют на преобладающие по розе ветров стороны света. В зависимости от направления наружного ветра и его силы работают клапаны, установленные с подветренной стороны, а клапаны, установленные с наветренной стороны, остаются закрытыми.

Приток воздуха должен быть организован через открывающиеся проемы дверей и окон в нижней зоне храма. В малых храмах допускается неорганизованный приток воздуха через неплотности дверных и оконных проемов.

Однако в данном издании, большое внимание уделяется многообразию архитектурных форм храмов и их элементов, которые играют важную роль в определении внешней аэродинамики культовых сооружений

Стоит отметить, что данные рекомендации по установке клапанов хлопушек не учитывают того, что при изменении скорости ветра и количества при-

хожан, будут раздаваться постоянные хлопки, мешающие проведению служб. Несмотря на достаточно подробное изложение требований к системам вентиляции, отсутствуют пример расчета систем естественной вентиляции и данные по аэродинамическим коэффициентам.

Также, более подробно, чем в СП 31-103-99 вопрос отопления вентиляции и кондиционирования воздуха рассмотрен в АВОК Стандарте–2–2004 [2] - переиздание АВОК Стандарта-2-2002. Следует отметить, что данный стандарт является временным, сроком действия четыре года, после чего должно было последовать его дальнейшее совершенствование и переиздание.

В документе приводятся: допустимые и оптимальные параметры внутреннего воздуха храмов, требования к теплозащите ограждающих конструкций, требования к теплоснабжению, отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха, рекомендации по организации воздухообмена. Кратко освещены разделы электроснабжения, автоматизации и противопожарной безопасности – в них даны ссылки на соответствующие нормативные документы, причем в разделе 11 дана ссылка на НПБ 108-96 «Культовые сооружения. Противопожарные требования» [139], являющийся самым первым документом, в котором приводились требования, выдвигаемые исключительно к православным храмам.

В Стандарте АВОК приводятся более подробные требования к допустимым параметрам внутреннего воздуха в зоне с пребыванием людей в основных помещениях храмов, оптимальным параметрам внутреннего воздуха обслуживаемой зоны основных помещений храма и величина кратностей воздухообмена в храме. В приложении 3 приведены важные справочные данные для проведения расчета теплового баланса и воздухообмена помещений храма, к которым относятся выделение теплоты, влаги и  $\text{CO}_2$  от свечей, выделение теплоты, влаги и  $\text{CO}_2$  одним человеком и т.д.

С точки зрения организации воздухообмена, в частности естественной вентиляции, важные рекомендации приводятся в разделе 9. Однако в п. 9.2 – 9.6, рассматриваются лишь вопросы размещения фрамуг в помещениях храма и, частично, их конструкция, не содержащая ни методики расчета определения

площади приточных и вытяжных фрамуг при естественной вентиляции, ни ссылок на эту методику. В приложениях рассматривается только пример расчета по определению сопротивления теплопередачи стены центральной части храма, строящегося в климатических условиях г. Москвы и требования к регулируемому проветриванию неотапливаемых храмов (приложения 4,5). Отсутствуют также данные по аэродинамическим коэффициентам, необходимым для расчета естественной вентиляции. Также не приводятся данные по воздухообмену в нерабочее время, например, во время мытья полов, когда влага должна удаляться из помещений посредством естественной вентиляции.

В НПБ 108-96. [139] в разделе 5 отопление и вентиляция дана ссылка на отмененный в настоящий момент СНиП 2.04.05-91\* «Отопление, вентиляция и кондиционирование», так как на момент издания документа, ни СП 31-103-99, ни АВОК Стандарт–2–2004 не были изданы. Данный нормативный документ ни разу не переиздавался с момента утверждения с добавлением или изменением ссылок. В разделах «Категория помещения» (3), «Электрооборудование» (4), «Пожарная автоматика» (7) приводятся ссылки на соответствующие документы: СНиП 2.04.09-84 «Пожарная автоматика зданий и сооружений» (в настоящий момент заменен на НПБ 88-2001\* «Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования»), РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений», НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности» (в настоящий момент заменен на НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»).

Анализ нормативных документов в области строительства и реконструкции православных храмов показал, что к таким сооружениям в настоящий момент выдвигаются особые требования. Современные технологии не стоят на месте, однако их неграмотное использование в православных храмах может привести к порче бесценных фресок и церковной утвари, а так же пагубно сказаться на самом сооружении. Отмечается также положительная тенденция роста исследований в рассматриваемой области, поиска различных эксперимен-

тальных значений, необходимых для расчетов, и совершенствования уже существующих нормативных документов. Прделана огромная работа по сбору сведений о конструкциях православных храмов, различных статей и публикаций, которые послужат не только необходимым пособием по проектированию и строительству культовых сооружений, но и для духовно-воспитательных целей.

В разделах, где говорится об организации воздухообмена, приводятся различные рекомендации по проектированию естественной вентиляции, однако они являются недостаточными, поскольку не учитывают ряд факторов, например, уникальные архитектурные особенности каждого культового сооружения. В нормативных документах также не приводится пример расчета естественной вентиляции для какого-либо конкретного культового сооружения, что существенно упростило бы применение рекомендаций на практике.

#### **1.4. Теоретическое обоснование выбора исследуемых православных храмов**

Анализ конструктивных решений для инженерных систем по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в помещениях культовых сооружений невозможен без знания объемно-планировочных особенностей храмов. Наиболее подробными источниками информации, содержащими многочисленные примеры архитектурно-планировочных решений и их описание являются работы И. Грабаря [52,53] и Г.В.Барановского [7].

И. Грабарь характеризует конструктивные особенности православных храмов, приводя конкретные примеры с фотографиями, эскизами и чертежами [52,53]. Огромное внимание в его работах уделяется исследованию конструкций деревянных православных храмов, как исконно русских образцов церковного зодчества. Начиная свой анализ конструктивных и архитектурных форм с простых и распространенных в свое время на Руси клетских храмов, автор постепенно подводит читателя к сочетающим в себе совокупность различных типов православных храмов, например, двадцатидвухглавая Преображенская цер-

ковь в Кижах [52]. Важность изучения архитектуры деревянных храмов в рамках проводимого исследования состоит в том, что при возведении каменных православных храмов происходит заимствование некоторых элементов, впервые появившихся в деревянном православном зодчестве.

В энциклопедии Г.В. Барановского [7] православным храмом посвящено пять разделов из десяти. На многочисленных иллюстрациях приводятся как православные храмы первой половины XIX века, так и более древние сооружения.

Время выпуска этих трудов на несколько лет опередило революцию 1917 года, после которой началось массовое разорение и разрушение храмов и монастырских комплексов – «живых» свидетелей истории России, её расцвета и быта.

При изучении архитектуры и конструктивных особенностей православных храмов Нижнего Новгорода и Нижегородской области наиболее подробными источниками информации являются работы нижегородского искусствоведа, доктора архитектуры Н.Ф. Филатова [200]. В его трудах наряду с описанием истории возведения православных храмов приводятся архитектурные особенности каждого культового сооружения.

При исследовании внешней аэродинамики наиболее важную роль играют архитектурные формы православных храмов. Соответственно для испытания в аэродинамической трубе и определения аэродинамических коэффициентов необходимо подобрать такие, ранее не исследованные культовые сооружения, которые обладают отличными друг от друга архитектурными элементами, конструкцией и т.д. Для решения этой задачи был произведен теоретический анализ существующих стилей, архитектурных форм культовых сооружений и их конструкций.

Для создания и поддержания требуемых параметров микроклимата важно так же оценить общее состояние православного храма на момент исследования. Ввиду намеренного разрушения советскими властями или иных причин далеко не все храмы сохранились до наших дней. В Нижнем Новгороде после

революции 1917 большая часть храмов сохранилась лишь потому, что с них были сняты купола с крестами, а их помещения использовались не по назначению, например, как складские.

Характерным примером может послужить Крестовоздвиженский женский монастырь, так как в 1918 году монастырь закрыли, а в помещениях обители был устроен концентрационный лагерь для политзаключенных, а затем военный городок. В итоге храм постановили снести и, несмотря на то, что данный приказ не был приведен в исполнение, монастырь разрушился до основания (в документах советских времен указано, что износ здания составлял 100%). Монастырь стал вновь действующим лишь в 2004 году.

Этот монастырский ансамбль ведет свою историю от Зачатьевской обители, основанной около 1370 г. как обычный для Древней Руси монастырь с рубленными строениями. В 1811 году (до этого времени монастырь выгорал 3 раза в 1685, 1715, 1809 г.) началось строительство монастырского комплекса, проект которого разработал губернский архитектор И.И. Межецкий. Собор в плане представлял собой равноконечный крест (35x35м) с четырьмя внутренними пилонами, поддерживающими центральный купол. Над крыльями ставились 4 малых главы. В формах собора архитектор предложил выразить основные символы христианства: огромный крест, концы которого вписывались в круг – знак вечности и постоянства.

В 1823 году собор был освящен, однако уже в 1832 году обрушилась его центральная глава, а кровля получила повреждения под тяжестью снежного покрова. Это произошло из-за того, что первоначально четыре квадратных в сечении пилона, поддерживающих мощное пятиглавие храма были запроектированы непропорционально тонкими, для увеличения естественного освещения интерьеров собора. Дальнейшей работой по реконструкции собора, в частности заменой накатного потолка возведенными в полтора кирпича сводами, занимался ярмарочный архитектор А.Л. Леер.



Рис 1.1 Крестовоздвиженский собор

Русские зодчие постепенно перенимали храмовую архитектуру и воплощали ее в деревянных культовых сооружениях, первоначально практически ничем не отличающихся от жилых зданий. Однако им хотелось возвысить церкви над всеми остальными сооружениями, что было невозможно при такой конструкции. В качестве одного из вариантов решения этой задачи, в деревянном зодчестве появляются первые шатровые храмы. Конструкция таких храмов подчеркивает их величие над остальными сооружениями, позволяя вместить большее количество молящихся, и является наиболее эффективной с точки зрения сопротивления ветровым нагрузкам[52].

В 1653 г. патриарх Никон вводит запрет на строительство шатровых храмов, который касался как деревянных, так и каменных сооружений. «Шатер» не исчезает из храмового зодчества полностью, он лишь комбинируется с различными элементами. «Шатер» также становится универсальным кровельным перекрытием для колоколен.

Эволюцию храмового зодчества и появление нового типа храма интересно проследить на примере Церкви Жен-Мироносиц. В XIV веке как и большинство храмов на Руси того времени она была деревянной и лишь в середине XVII

века, во время бурного экономического рассвета перестраивается из камня. В 1649 г. была освещена эта двухъярусная церковь: первый этаж – в честь Знамения, второй – в честь Жен-мироносиц. Объединение теплой и холодной церкви в одном здании на разных этажах было нестандартным решением. Ранее в приходах рубили два храма: малый, обычно клетского типа, для ведения службы зимой и просторный (в основном шатрового типа) – летом. Строго по оси располагались алтарь, молельный зал, трапезная и колокольня над западным выходом. Такое расположение элементов по оси восток-запад ознаменовало появление первого храма на Руси типа «корабль».

В качестве перекрытия для колокольни был использован шатер. Богато и празднично смотрелось покрытое зеленой поливной черепицей пятиглавие церкви с золочеными крестами и многоцветная фресковая роспись в тимпанах полукруглых закомар. На второй этаж вели марши выносного крыльца-всхода с площадками отдыха, у которых было бочечное покрытие. Арки рундука нижнего отдыха и проемы открытой в сторону паперти имели гирьки – висяги. Своды нижней церкви и трапезной опираются на 2 столпа, причем размеры трапезной, как теплого так и холодного храмов равны размерам молельным холлам (8,6x10,6м). Своды верхних помещений опор не имеют. Вся конструкция производила исключительно целостное впечатление, благодаря удачно найденным пропорциям всех частей архитектуры.

Однако, в дальнейшем, эта целостность, прорисованная в деталях архитектуры, была искажена. К северной стороне трапезной пристроили двухэтажный кирпичный объем в честь апостолов Петра и Павла; верхнее помещение с открытыми арочными проемами стало использоваться как придел в честь Евфимия Суздальского и паперть холодной церкви; новый придел в нижней церкви освятили в честь Макария Желтоводского – все это привело к стеснению помещений. Не миновал церковь и пожар, в результате которого в 1848 году закоптилась фресковая роспись стен. На сегодняшний день основные элементы архитектуры храма, в том числе и утерянные, зафиксированы на снимках ниже-

городского фотохудожника М. П. Дмитриева, которые представляют особую ценность для реставраторов, пытающихся вернуть храму первоначальный вид.

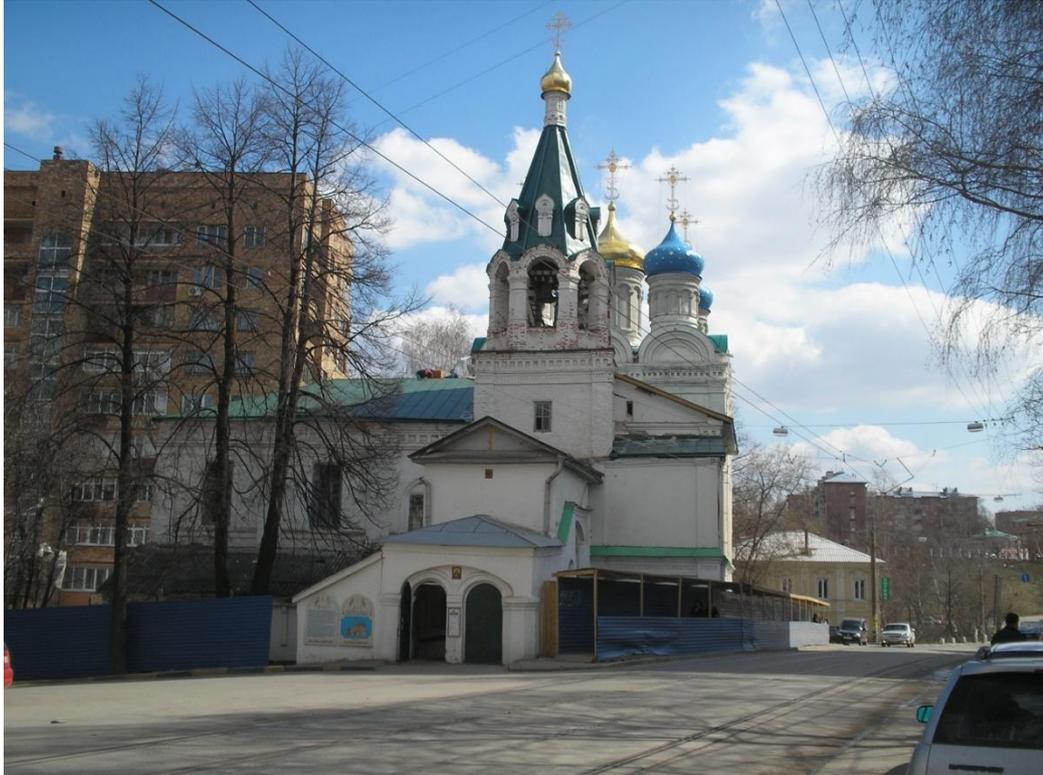


Рис 1.2 Церковь Жен-Мироносиц

Как и Церковь Жен-Мироносиц в середине XVII века из камня выстроена и Рождественская церковь торговым гостем С.Ф. Задориным. До 1653 года она была деревянной, шатрового типа. Однако, после «медного бунта» 1662 г., когда промышленник чудом избежал смерти и оставил свое предприятие и двор заброшенными, их со временем прибрал к своим рукам известный русский финансист, землевладелец и политический деятель Г.Д. Строганов. Единый подход к решению всех возводимых зданий в самых различных городах страны, был исследовательской литературой охарактеризован как принадлежавшее к одному стилевому направлению и получил название «строгановское барокко». Однако, среди всех выстроенных Г.Д. Строгановым храмов нижегородская Рождественская церковь отличается особой монументальностью образа, органической взаимосвязью пышного декоративного убранства с завершением центральной главы сразу двумя кованными коронами. Двухъярусная церковь, вверху которой располагался трехапсидный алтарь, молельный зал, бесстолп-

ная трапезная и паперть, проемы которой имели белокаменные гирьки-висяги, кровля с торца – фигурный аттик. Стройное световое пятиглавие поставлено по сторонам света, как и в деревянных храмах. Сомкнутый свод с треугольными лотками имеет красивый рисунок. Снаружи и внутри храм обильно украшен белокаменной резьбой, стены расписаны орнаментом. В 1685 г. к церкви был пристроен Григорьевский предел, а в 1820-1823 годах колокольню, ранее стоявшую отдельно, по уровню второго яруса соединили с папертью крытым переходом.

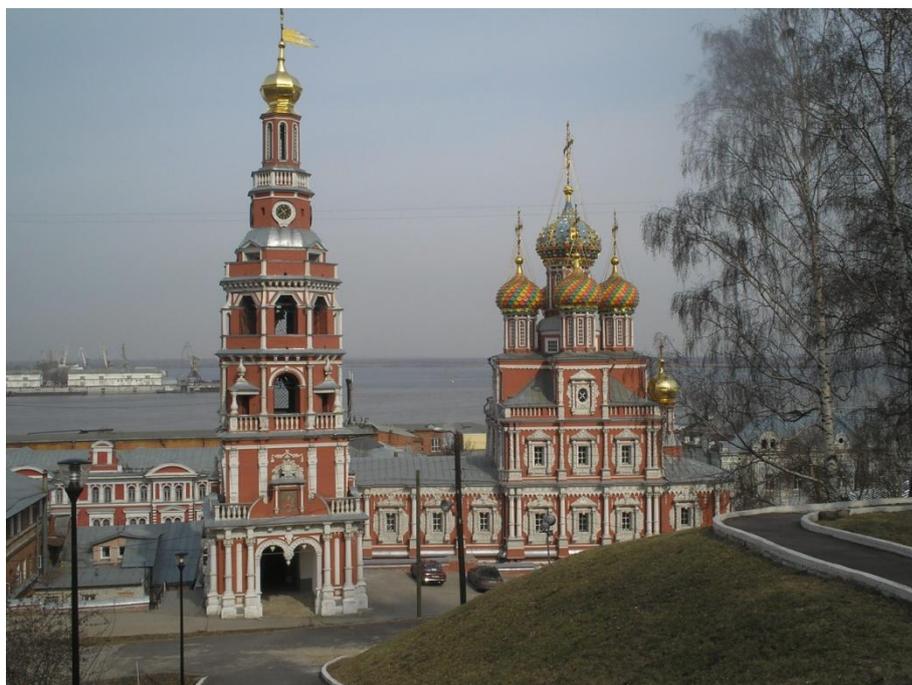


Рис 1.3 Рождественская церковь

В результате смешения разнородных конструктивных элементов в православном зодчестве стали появляться новые стили.

В появлении неовизантийского стиля была прослежена ориентация на византийское искусство VI — VIII веков н.э., а художественным и идеологическим образцом для строительства храмов служил Софийский собор в Константинополе.

У таких храмов купола имеют, как правило, приземистую форму и располагаются на широких низких барабанах, опоясанных оконной аркадой. Центральный купол больше всех остальных. Часто барабаны малых куполов выступают из здания храма лишь наполовину — либо в виде апсид, либо в виде

барабанов, наполовину утопающих в крыше. Малые купола такой формы в византийской архитектуре называются конхами. Внутренний объём храма традиционно не разделяется пилонами или крестовыми сводами, образуя, таким образом, единый церковный зал, создающий ощущение просторности и способный в некоторых храмах вмещать несколько тысяч человек.

Среди храмов такого стиля стоит отметить Спасо-Преображенский собор, построенный в Сормове, который задумывался как более вместительный храм для этой быстро развивавшейся в промышленном плане деревни, а в настоящий момент района Нижнего Новгорода. Архитектором этого храма стал инженер-строитель П.П. Малиновский, ярко проявивший себя при подготовке Нижнего Новгорода к открытию Всероссийской промышленно-художественной выставки 1896 года. Закладка фундамента храма (примерно 47х30 метров) состоялась в сентябре 1900 г. Высота этого храма до креста 43м. Огромный купол поддерживают полукупола расставленные по сторонам и передающие давление верха на усиленные кладкой угловые части. Пониженная колокольня подчеркивает центричность композиции.

Первоначально планировалось построить одноэтажную церковь на сводчатом подцерковье, предназначавшемся для размещения центрального отопления и служебных помещений. Однако в 1902 было принято решение о дополнительном размещении трех престолов. Храм был освещен в 1903 году. Стоит также отметить редкий по композиции 6 ярусный резной иконостас, увенчанный восьмиконечным крестом и 7 мраморных ступеней солеи из молельного зала к царским вратам вместо обычных трех.

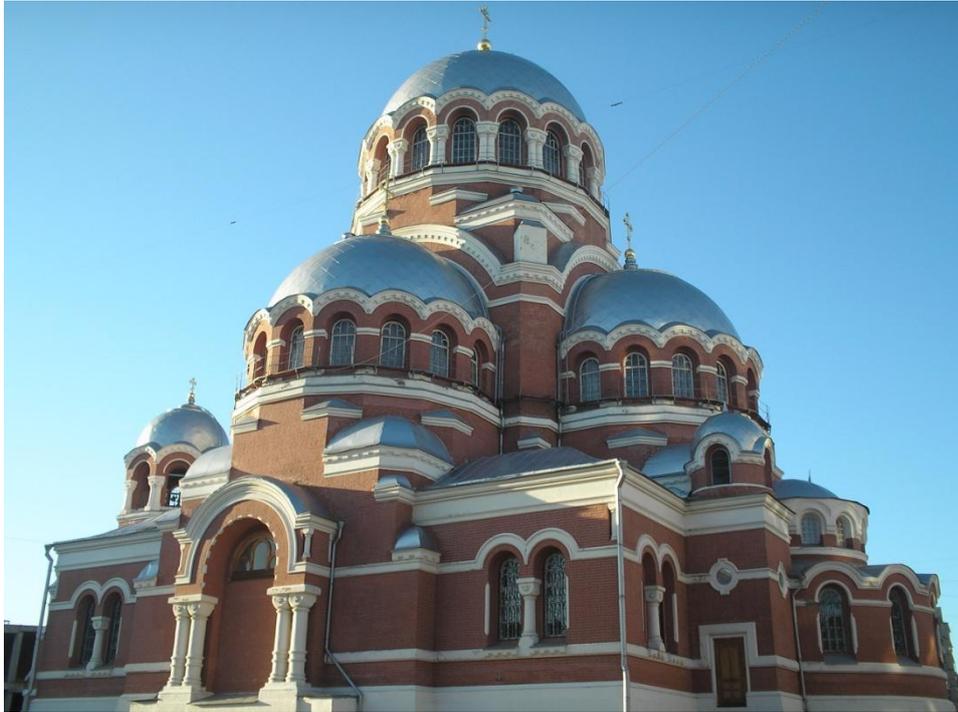


Рис 1.4 Спасо-Преображенский собор

На основании проведенного теоретического исследования было выявлено, что Крестовоздвиженский собор, имеющий форму в плане креста, вписанного в круг, церковь Жен-Мироносиц (объединенная летняя и зимняя церковь в форме корабля), Рождественская церковь (Строгановское барокко; молельный зал соединяется с колокольной через второй ярус основного здания) и Спасо-Преображенский собор (неовизантийский стиль) – это ранее не исследованные на предмет внешней аэродинамики культовые сооружения, обладающие уникальной архитектурой и объемно-планировочным решением. Для расчета аэрации требуется знание аэродинамических коэффициентов, а, следовательно, необходимо создать модели по планам и разрезам этих храмов с учетом критериев подобия и провести испытания в аэродинамической трубе. С помощью известных аэродинамических коэффициентов можно определить необходимые площади приточных и вытяжных фрамуг, чтобы обеспечить требуемый воздухообмен в помещении. Данные полученные в результате исследования этих храмов могут быть также использованы для культовых сооружений со схожей архитектурой и объемно-планировочным решением.

## Выводы по первой главе

Проведенный анализ литературы позволил определить цель исследования: разработка теоретических основ и практических рекомендаций по созданию и поддержанию микроклиматических условий в исследуемых православных храмах, зависящих от внутренних и наружных климатических воздействий. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Изучить архитектурные особенности православных храмов, функциональные особенности помещений, а также провести обзор научной литературы, где приводятся результаты исследований теплотехнических и аэродинамических характеристик для различных типов сооружений.
- На основе теоретических исследований определить основные теплотехнические и аэродинамические характеристики, определяющие микроклиматические условия для различных видов храмов и их элементов.
- Исследовать наружные аэродинамические характеристики храмов и элементов для обеспечения: требуемых параметров микроклимата вызывающих минимальные температурные деформационные напряжения конструкций, сохранности фресок, станковой живописи, художественной росписи и предметов культовых обрядов.
- Провести экспериментальные исследования для определения требуемых воздухообменов на основе полученных теплотехнических и аэродинамических характеристик ограждающих конструкций храмовых сооружений.
- Провести сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований и разработать методики инженерных расчетов и практические рекомендации по обеспечению требуемых режимов работы систем кондиционирования микроклимата храмов, с учётом функциональной особенности помещений.

## **Глава 2. Физико-математическая модель аэродинамических процессов**

### **2.1. Общие сведения о конвективном теплообмене**

Аэрация представляет собой организованный воздухообмен в помещении за счет сил ветрового давления и разности плотностей воздушных потоков. Причем работа системы отопления в зимний период является определяющей для организации данного процесса. Таким образом, аэрация в помещении обусловлена конвекцией – процессом передачи тепла теплообменом между твердыми и жидкими средами и теплопроводностью связанной с движением жидкости или газа [64]. Теплопроводность - это процесс переноса тепловой энергии, обусловленный разностью температур в материальной среде и связанный с движением микроскопических частиц, составляющих эту среду. Стоит также отметить, такой процесс переноса тепловой энергии, как излучение, реализующийся в виде электромагнитных волн.

Конвекция неизбежно связана с теплообменом и теплопроводностью, так как окончательная передача энергии от одного элемента к соседнему элементу, несмотря на то, что движение жидкости изменяет процесс переноса тепловой энергии, осуществляется теплопроводностью в неподвижной среде или теле. Поскольку скорость движения жидкости на поверхности будет обращаться в ноль, то и в данном случае процесс будет обладать теплопроводностью в пограничном слое. В некоторых случаях и процессы излучения связаны с конвекцией [64]. Все вышеизложенное лишь подтверждает сложность изучения процесса конвекции.

В конвективном теплообмене выделяют два основных процесса - вынужденную и естественную конвекцию. При возникновении движения жидкости под воздействием какого-либо внешнего фактора (например, течение жидкости извне около нагретого тела) будет иметь место вынужденная конвекция. В случае отсутствия наложенных течений извне, когда течение возникает вследствие разности плотностей, обусловленной разностью температур или концентраций

в поле массовых сил, имеет место естественная конвекция. Разность плотностей будет создавать выталкивающую силу, за счет которой и будет возникать течение. Таким образом, главное отличие между естественной и вынужденной конвекцией заключается в природе течения. При вынужденной конвекцией в общем случае известна наложенная внешняя энергия, а при естественной конвекции течение возникает в результате разности плотностей с гравитационным или каким-либо другим полем массовых сил, следовательно, оно постоянно связано с полями температуры и концентрации и зависит от них. При естественной конвекции возникающее течение заранее неизвестно и оно может быть определено лишь из совместного рассмотрения процессов тепло- и массообмена и механизмов течения жидкости или газа. Существуют также практические случаи, в которых ни один из этих процессов теплообмена не является преобладающим, то есть становится необходимым определить влияние и естественной и вынужденной конвекции. Такой процесс теплообмена получил название смешенная конвекция.

## **2.2. Особенности физико-математического моделирования православных храмов.**

Православные храмы, в отличие от зданий общегражданского назначения имеют ряд конструктивных особенностей, которые влияют на тепломассообменные процессы, происходящие внутри помещений.

В первую очередь это доминирование вертикального размера над горизонтальным. Как правило, по высоте вертикальной стены молельного зала располагается несколько ярусов оконных проемов. Перегородки, отделяющие один ярус от другого, отсутствуют. Между оконными проемами могут, находиться фрески или иконы, делающие невозможным размещение отопительных приборов под каждым ярусом окон. Следовательно, на вертикальной стене православных храмов под несколькими ярусами окон может располагаться только один ряд отопительных приборов.

В таком случае математическое моделирование течения жидкости вдоль внутренней поверхности наружной стены православного храма удобнее разделить на несколько составляющих. Отдельно рассмотреть процесс течения над отопительным прибором, вдоль оконного проема и «пустого» участка стены, отделяющего ярусы окон друг от друга (рис 2.1).

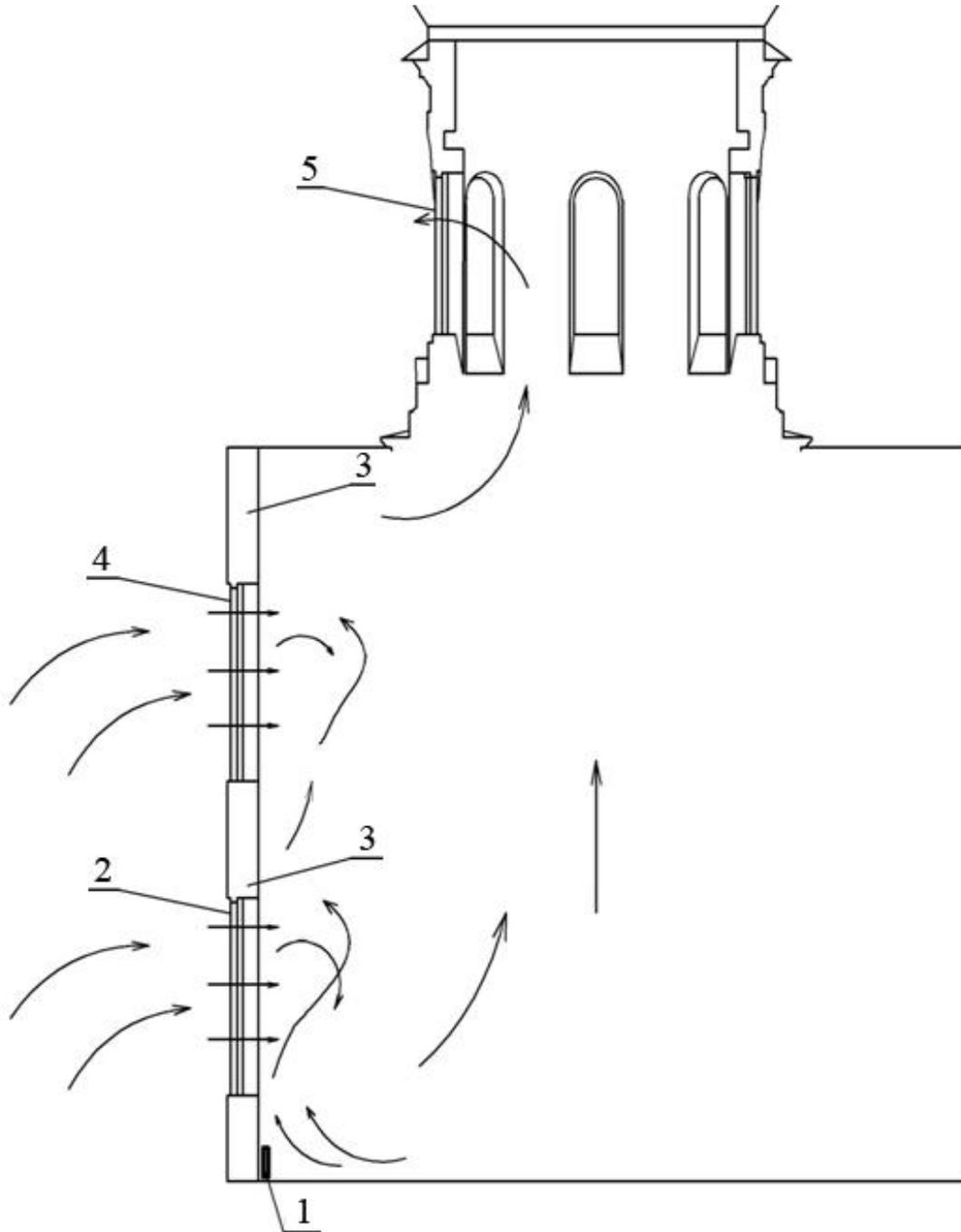


Рис. 2.1 Схема движения воздушных потоков в православном храме: 1) отопительный прибор; 2) оконный проем первый ярус; 3) часть стены без окон; 4) оконный проем второй ярус; 5) оконный проем в барабане храма.

В отличие от гражданских зданий, где расстояние от отопительного прибора до подоконника составляет в среднем 0,2 м в православных храмах оно может достигать от 0,5 – 1 м (рис. А.1). В храмах также имеют место тепловыделения, как от массового скопления людей, так и от горящих свечей (последнее характерно только для русских православных храмов, так как в других православных странах, например в Черногории и в Греции, для свечей выделяется отдельное помещение без икон и фресок). Восходящий конвективный поток от отопительного прибора затягивает сажу от свечей, которые впоследствии остаются на стене, что приводит к порче фресок или икон, находящихся над отопительным прибором. Поэтому рекомендуется на расстоянии 0,2 м от отопительного прибора устанавливать пластину, соотносимую по размерам с горизонтальными размерами прибора, которая будет защищать от сажи церковную утварь, находящуюся над радиатором. Следовательно мы получаем те же самые условия для отопительных приборов, что и для гражданских зданий, тем более что установка радиаторов в православных храмах почти всегда открытого типа. Значения скоростных и температурных полей над отопительными приборами в православных храмах были определены экспериментально (Приложение А). Значения коэффициентов теплоотдачи приводятся в справочной литературе [2,96].

Таким образом, для физико-математического моделирования течения жидкости вдоль внутренней поверхности наружной стены молельного зала, необходимо рассмотреть две задачи:

- 1) процесс течения жидкости вдоль «пустого» участка стены, отделяющего ярусы окон друг от друга;
- 2) процесс течения жидкости вдоль оконного проема.

### 2.3. Теплоотдача при свободном движении на вертикальных стенах православных храмов

Наиболее подходящей для математического описания процесса теплоотдачи при свободном движении на вертикальных стенах православных храмов будет задача описания теплоотдачи свободного движения вдоль вертикальной пластины, рассмотренной в следующих литературных источниках [78,116]. Все уравнения математически выводятся при ламинарном движении, уравнения при турбулентном и переходном режиме были определены экспериментальным путем [78]

По условию задачи вертикальная пластина с неизменной температурой  $t_c$ , находится в жидкости или газе. Жидкость вдали от пластины остается неподвижной, что говорит об отсутствии вынужденного течения, а температура вдали от пластины постоянна и равна  $t_0$ . Независимо от того  $t_c > t_0$  или на оборот  $t_c < t_0$ , полученные результаты будут справедливы и в том и в другом случае (ввиду незначительной разницы температур), который и будет происходить в православных храмах. Рассматривая задачу с  $t_c > t_0$  появление у пластины подъемное движение слоя жидкости в то время как вдали от пластины скорость жидкости будет по-прежнему равна нулю.

Начало координат располагается у нижней кромки пластины, а ось  $Oy$  нормально к ее поверхности. Вдоль оси  $Ox$  пластина бесконечна (рис 2.2) , а процесс стационарный.

Для упрощения задачи были приняты следующие допущения:

- силы инерции были пренебрежимо малы по сравнению с силами тяжести и вязкости;
- конвективный перенос теплоты, а также теплопроводность вдоль движущегося слоя жидкости можно не учитывать;
- градиент давления равен нулю;
- физические параметры жидкости (исключая плотность) постоянны; плотность является функцией температуры.

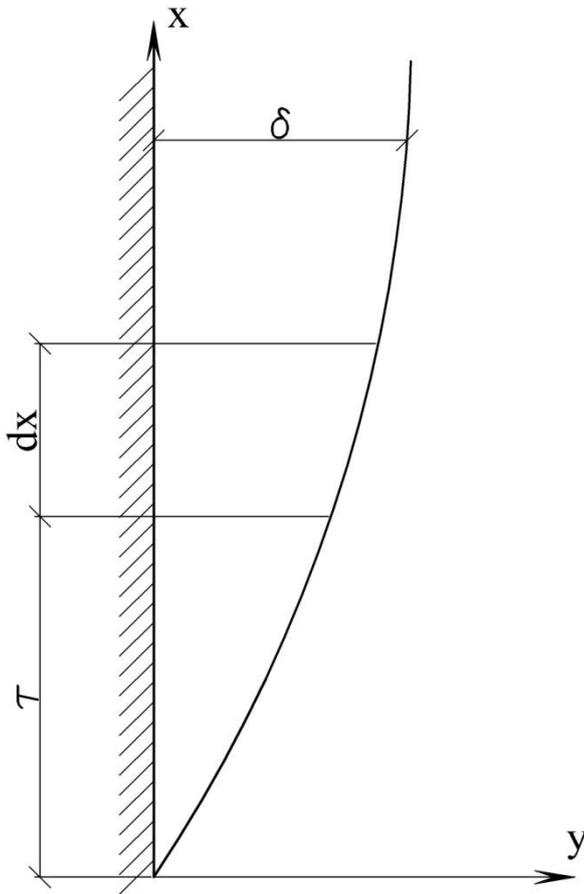


Рис. 2.2 Графическая иллюстрация к выводу формул при естественной конвекции вдоль вертикальной пластины

Исходным уравнением для решения этой задачи будет уравнение движения вязкой жидкости:

$$\rho \frac{d\omega_x}{d\tau} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{d\omega_y}{d\tau} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right)$$

(2.1)

$$\rho \frac{d\omega_z}{d\tau} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right)$$

В векторном виде данное уравнение запишется следующим образом:

$$\rho \frac{d\vec{\omega}}{d\tau} = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \Delta \vec{\omega} \quad (2.2)$$

Запись уравнения в таком виде наиболее наглядно демонстрирует все силы, входящие в уравнение движения вязкой жидкости (результатирующую с учетом сил инерции в левой части и силы тяжести, давления и трения в правой части). Однако данное уравнение не учитывает зависимость физических параметров жидкости от температуры. В частности не учтена зависимость плотности от температуры. Свободные движения жидкости определяются разностью плотностей холодных и нагретых частиц жидкости. Таким образом, ограничиваясь учетом переменности плотности (в общем случае при  $\rho \neq \text{const}$  требуется учитывать и энергию деформации), необходимо использовать коэффициент объемного расширения  $\beta$ . Принимается, что данная величина является постоянной в заданном интервале температур и независимой от температуры. С учетом всех преобразований, подробно изложенных в [76], уравнение примет вид:

$$\frac{d\vec{\omega}}{d\tau} = \beta \theta \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{\omega} \quad (2.3)$$

Однако по условию задачи движение жидкости осуществляется только вдоль оси  $Oy$ , градиент давления равен 0 и силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами тяжести и вязкости. Таким образом, уравнение движения вязкой жидкости, с учетом преобразований и линейной зависимости плотности от температуры ( $\rho = \rho_0(1 - \beta\theta)$ ) примет следующий вид:

$$\mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} = -g \rho_0 \beta \theta \quad (2.4)$$

Будем полагать, что температура в движущемся слое жидкости будет изменяться по уравнению

$$\theta = \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 \quad (2.5)$$

где согласно условию задачи  $\theta_c = \text{const}$ ,  $\theta = t - t_0$  и  $\theta_c = t_c - t_0$

Уравнение удовлетворяет граничным условиям:

$$\theta_c = \theta \text{ при } y = 0 \text{ и } \theta = 0 \text{ при } y = \delta$$

В свою очередь коэффициент теплоотдачи определяется уравнением:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\theta_c} \left( \frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.6)$$

Из уравнения (2.5) следует:

$$\left( \frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{2\theta_c}{\delta}$$

Подставляя это значение в уравнение 2.6 получим:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} \quad (2.7)$$

Учитывая соотношение для плотности, и подставляя уравнение (2.5) в (2.4) уравнение движения будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} = -\frac{g\rho_0\beta\theta_c}{\mu} \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^2$$

Заменяя множитель в правой части на  $A = \frac{g\rho_0\beta\theta_c}{\mu} \neq f(y)$  и дважды проинтегрировав получившееся уравнение движения, получим:

$$\omega_x = -A \left( \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3\delta} + \frac{y^4}{12\delta^2} \right) + c_1 y + c_2 \quad (2.8)$$

Применяя граничные условия для скорости ( $\omega_x = 0$ , как при  $y = 0$ , так и при  $y = \delta$ ) в уравнении (2.8), получим следующие значения для постоянных интегрирования:  $c_1 = \frac{A}{4}\delta$ ;  $c_2 = 0$

Подставляя значения  $c_1$  и  $c_2$  в уравнение (2.8) получим следующее уравнение распределения скоростей в движущемся слое жидкости:

$$\omega_x = -A \left( \frac{\delta}{2} y - \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3\delta} + \frac{y^4}{12\delta^2} \right) \quad (2.9)$$

Максимум скорости соответствует значению  $y = 0,37004\delta \approx \frac{\delta}{3}$

Стоит отметить, что распределение скоростей  $y = \delta$  не удовлетворяет условию  $\left(\frac{\partial \omega_x}{\partial y}\right)_{y=\delta} = 0$ . Производная при  $y = \delta$  имеет конечное значение. Это обстоятельство является следствием приближенного решения.

Тогда среднеинтегральная скорость, согласно уравнению (2.9) будет определяться следующим образом:

$$\bar{\omega}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \omega_x dy = \frac{\rho g \beta \theta_c \delta^2}{40\mu} \quad (2.10)$$

Для простоты решения среднюю температуру жидкости в слое определяется приближенно как среднеинтегральная по сечению слоя:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta dy = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 dy = \frac{\theta_c}{3} \quad (2.11)$$

При принятых условиях величина средней температуры не зависит от координаты  $x$ .

Расход жидкости через поперечное сечение слоя  $\delta$  определяется по плотности  $\rho_0$ . Причем, полагая, что жидкость плотностью  $\rho_0$ , вовлекаясь в движущийся слой, приобретает в среднем скорость  $\bar{\omega}_x$ . Если продифференцировать формулу для такого расхода  $G = \rho_0 \bar{\omega}_x \delta \cdot l$  и подставить в него уравнение (2.10), то мы получим следующее выражение:

$$dG = d\left(\frac{\rho_0^2 g \beta \theta_c \delta^3}{40\mu}\right) = \frac{3\rho_0^2 g \beta \theta_c \delta^2}{40\mu} d\delta \quad (2.12)$$

Необходимо также учесть теплоту, которая затрачивается на нагрев жидкости с первоначальной температуры  $t_0$  до различных температур, лежащих в интервале от  $t_0$  до  $t_c$ , или в среднем до температуры  $\bar{\theta}$ .

$$dQ = c_p \theta dG = \alpha \theta_c dxl = \frac{2\lambda}{\delta} \theta_c dxl \quad (2.13)$$

Из уравнения (2.13) следует :

$$dG = \frac{2\lambda}{c_p \delta} \frac{\theta_c}{\theta} dx = \frac{6\lambda}{\delta c_p} dx \quad (2.14)$$

Если приравнять правые части уравнений (2.12) и (2.14), то получится уравнение, описывающее изменение по высоте стенки  $\delta$ , интегрирование которого даст следующее выражение:

$$\frac{3\rho_0^2 g \beta \theta_c \delta^4}{160\mu} = \frac{6\lambda}{c_p} x + c \quad (2.15)$$

Постоянная интегрирования находится из условия  $x=0$  при  $\delta=0$ . Откуда  $c=0$ .

Таким образом из уравнения (2.15) значение  $\delta$  будет равно

$$\delta = 4,234 \sqrt[4]{\frac{\mu \lambda x}{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c}} \quad (2.16)$$

Подставляя уравнение 2.16 в уравнение 2.7 получим:

$$\alpha = 0,4374 \sqrt[4]{\frac{c_p \beta \rho_0^2 g \theta_c \lambda^3}{\mu x}} \quad (2.17)$$

Для того, чтобы привести уравнение (2.17) к безразмерному виду необходимо левую и правую части уравнения умножить на  $x$  и разделить на  $\lambda$ , тогда после преобразований получается следующее выражение:

$$Nu_x = \frac{\alpha x}{\delta} = 0,4374 \sqrt[4]{\frac{g \beta \theta_c x^3}{\mu^2 / \rho_0^2} \frac{\mu c_p}{\lambda}} = 0,473 (Gr_x Pr)^{0,25} \quad (2.18)$$

Таким образом, из уравнения (2.18) следует, что для  $Nu_x = f(Gr_x Pr)$ , что подтверждается и теорией подобия. В рассматриваемом случае температуры  $t_c$  и  $t_0$  постоянны, следовательно, и неизменным будет температурный напор  $\theta_c$ .

Из уравнения (2.18) следует, что  $\alpha = cx^{-0,25}$  где  $c \neq f(x)$  при этом

$$\alpha = \frac{1}{l} \int_0^l \alpha dx = \frac{1}{l} \int_0^l cx^{-0,25} dx = \frac{4}{3} cl^{-0,25} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l}$$

где  $\alpha_{x=l}$  - местный коэффициент теплоотдачи в точке, определяемой координатой  $x = l$ .

Тогда средняя теплоотдача вертикальной пластины при в ламинарном течении

$$\overline{Nu}_l = 0,63(Gr Pr)^{0.25} \quad (2.19)$$

Коэффициенты пропорциональности в формулах (2.18) и (2.19) нуждаются в некоторых упрощениях, так как эти формулы были получены в ряде допущений, в частности не учитывались силы инерции. Точные решения с учетом сил инерции, проведенные Польгаузенем, Шу, Саундерсом, Греггом и Спэрроу показывают зависимость коэффициентов пропорциональности от числа Прандтля. Наиболее существенно проявляется влияние инерционных сил при небольших значениях чисел Прандтля, а интенсивность теплоотдачи при постоянной температуре стенки примерно на 7% меньше, чем при постоянной плотности теплового потока на стенке [79].

Экспериментальные исследования показывают, что при числах Прандтля, значения которых превышает 0,7 опытные данные можно описать формулами вида (2.17) и (2.19), с постоянными коэффициентами, однако значения коэффициентов несколько отличаются от полученных в формулах. Помимо других факторов, величина коэффициентов пропорциональности зависит и от выбора определяющей температуры.

Для расчета местных коэффициентов теплоотдачи при свободном ламинарном течении вдоль вертикальных стенок можно использовать формулу [79,116]

$$Nu_{жс} = 0,60(Gr_{жс} Pr_{жс})^{0.25} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0.25} \quad (2.20)$$

В данной формуле определяющей является температура жидкости за пределами движущегося слоя, а определяющий размер отсчитывается от места начала теплообмена. Эта зависимость получена при условии, что  $q_c = const$ , а ус-

средняя коэффициенты теплоотдачи при данных условиях  $\bar{\alpha}_l = \frac{5}{4} \alpha_{x=l}$  формула для их расчета будет иметь следующий вид:

$$\overline{Nu}_{жс} = 0,75(Gr_{жс} Pr_{жс})^{0,25} (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25} \quad (2.21)$$

В данной формуле по-прежнему определяющей температурой является температура жидкости за пределами движущего слоя, а определяющим размером является длина пластины, отсчитываемая от начала теплообмена.

Формула (2.20) получена для теплоносителей с числами Прандтля от 0,7 до  $3 \cdot 10^3$  и справедлива для диапазона  $10^3 < Gr_{жс} Pr_{жс} < 10^9$ .

Рассматривая развитое турбулентное течение, возникающее при  $Gr_{жс} Pr_{жс} > 6 \cdot 10^{10}$ , для местных коэффициентов теплоотдачи [79,116] будет справедлива следующая формула:

$$Nu_{жс} = 0,15(Gr_{жс} Pr_{жс})^{0,33} (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25} \quad (2.22)$$

в которой определяющие температуры и линейный размер, выбраны также как и в формуле (2.20).

Линейный размер входит в числа Nu и Gr

$$Nu_{жс} = \frac{\alpha x}{\lambda_{жс}} \quad \text{и} \quad Gr_{жс}^{0,33} = \left( \frac{g \beta \theta_c x^3}{\nu_{жс}^2} \right)^{0,33}$$

Откуда следует, что при развитом турбулентном течении коэффициент теплоотдачи не зависит от линейного размера, таким образом, местный коэффициент теплоотдачи равен среднему.

Переходный режим согласно опытным данным различных исследователей наступает при  $10^9 < Gr_{жс} Pr_{жс} < 10^{10}$ . Переходный режим отличается неустойчивостью процесса течения и теплоотдачи и, как следствие, большим разбросом опытных точек. Переходная область течения имеет место на определенной длине стенки, на которой в среднем теплоотдача возрастает от значения, соответствующего ламинарному течению жидкости до значения, соответствующего турбулентному движению. Наибольшее и наименьшее значения коэффициента

теплоотдачи в переходной области можно определить соответственно по уравнениям (2.20) и (2.22).

При ламинарном течении коэффициент теплоотдачи уменьшается по высоте пропорционально  $x^{-0.25}$ . В переходной области течения коэффициент теплоотдачи нестабилен во времени и в среднем увеличивается до значений, характерных для турбулентного течения. При турбулентном течении коэффициент теплоотдачи от  $x$  не зависит.[79, 140, 141]

#### **2.4. Теплоотдача при свободном движении вдоль оконных проемов православных храмов**

Данную задачу невозможно рассмотреть только с одной позиции, так как в отличие от наружной стены, окно может быть как закрыто полностью так и приоткрыто. И в том и в другом случае будет иметь место вдув холодных воздушных потоков с улицы, охлаждающий нагретый восходящий конвективный поток. Таким образом, для физико-математического моделирования процесса течения жидкости вдоль оконных проемов необходимо опираться на теоретические и экспериментальные исследования в области изучения вдува газов и различных способов охлаждения через поры, щели и т.п.

Решение подобной задачи приводится в [116], по условию которой нагретая пластина обтекается потоком нагретого газа, для охлаждения поверхности которой подается инертный газ с некоторой постоянной скоростью вдува. Стоит отметить, что движение этого стационарного и плоскопараллельного потока происходит вдоль оси  $Ox$ , следовательно  $\frac{\partial z}{\partial \tau} = 0$ ;  $v_z = 0$ . С учетом этого система дифференциальных уравнений переноса импульса, теплоты и массы запишется следующим образом:

$$\rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad (2.22)$$

$$c_p \rho v_x \frac{\partial T}{\partial x} + c_p \rho v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \rho D_{1-2} (c_{p1} - c_{p2}) \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial W}{\partial y} \quad (2.23)$$

$$\rho v_x \frac{\partial W}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_{1-2} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad (2.24)$$

В рассмотренных уравнениях,  $W$  – относительная концентрация ( $W \equiv p_{10}$ ). Предполагается, что обтекающая жидкость является двухкомпонентной газовой смесью при постоянном давлении. Индексом 1 обозначается газ обтекающий пластину, индекс 2 – вдуваемый газ. Эффектами Соре (термодиффузия) и Дюфо (перенос теплоты за счет диффузионной теплопроводности) пренебрегаем.

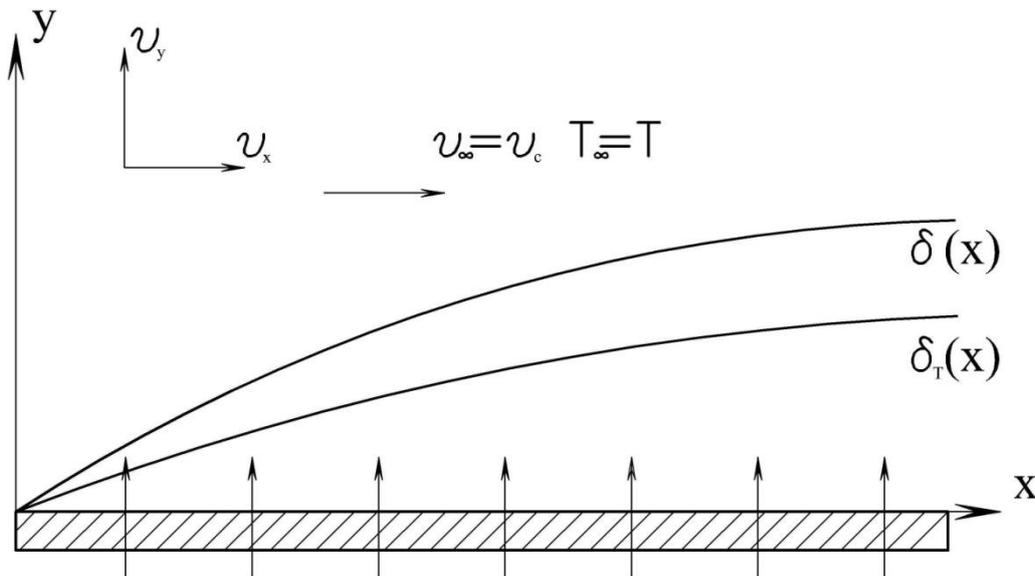


Рис. 2.3 Графическая иллюстрация к выводу формул при обтекании пластины со вдувом в пограничный слой.

Граничные условия выглядят следующим образом:

При  $y = 0$ ;  $v_x = 0$ ;  $v_y = v_\omega = const$   $T = T_\omega = const$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{\omega} = 0; \quad W = W_{\omega} = const;$$

$$\text{При } y \rightarrow \infty; \quad v_x = v_{\infty}; \quad T = T_{\infty}; \quad W = W_{\infty};$$

Для решения системы уравнений (2.21) – (2.24) вводятся следующие упрощения:

- 1) Переносом теплоты путем диффузии пренебрегают
- 2) Жидкость считается несжимаемой
- 3) Переносные свойства жидкости считают постоянными:

$$\eta = const, \lambda = const, D_{1-2} = const$$

Таким образом, система уравнений (2.21)-(2.24) принимает вид:

$$\rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2.27)$$

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.28)$$

$$v_x \frac{\partial W}{\partial x} + v_y \frac{\partial W}{\partial y} = D \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \quad (2.29)$$

Где  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  - коэффициент температуропроводности,  $\frac{m^3 \circ C}{c}$

Из дифференциальных уравнений переноса можно получить интегральные уравнения переноса пограничного слоя для рассмотренных граничных условий. Используя уравнение Бернулли имеем:

$$\rho v_{\infty} \frac{dv_{\infty}}{dx} = - \frac{dv_{\infty}}{dx} \quad (2.30)$$

Дифференциальное уравнение переноса импульса для случая градиентно-го обтекания ( $\frac{\partial p}{\partial x} \neq 0$ ) плоской пластины стационарным потоком можно записать следующим образом:

$$\rho \frac{\partial v_x^2}{\partial x} + \rho \frac{\partial(v_x \cdot v_y)}{\partial y} = \rho v_\infty \frac{dv_\infty}{dx} + \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial(\rho v_\infty v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_\infty v_y)}{\partial y} = v_x \frac{dv_\infty}{dx} \quad (2.32)$$

Вычтем из уравнения (2.32) уравнение (2.31) почленно

$$\frac{\partial}{\partial x} [\rho v_x (v_\infty - v_x)] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho v_y (v_\infty - v_x)] + (v_\infty - v_x) \rho \frac{dv_\infty}{dx} = -\eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (2.33)$$

Используя граничные условия, проинтегрируем уравнение (2.33) по  $y$  в пределах от 0 до  $\delta$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta [\rho v_x (v_\infty - v_x)] dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} \int_0^\delta (\rho v_\infty - \rho v_x) dy = \eta_\omega \left( \frac{dv_x}{dy} \right)_\omega + v_\omega \cdot v_\infty \cdot \rho_\omega \quad (2.34)$$

Данное уравнение отличается от соответствующего уравнения без вдува дополнительным членом  $v_\omega \cdot v_\infty \cdot \rho_\omega$ , характеризующим виртуальное трение за счет вдува. Интегральное уравнение пограничного слоя для переноса теплоты получаем из дифференциального уравнения для случая, когда  $\frac{\partial p}{\partial x} \neq 0$

Проинтегрируем уравнение переноса теплоты по  $y$  в пределах от 0 до  $\delta$ :

$$\int_0^{\delta T} c_p \rho v_x \frac{\partial T}{\partial x} dy + \int_0^{\delta T} c_p \rho v_y \frac{\partial T}{\partial x} dy = \int_0^{\delta T} \rho v_x v_\infty \frac{dv_\infty}{dx} dy + \int_0^{\delta T} \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \quad (2.35)$$

Вторые члены левой и правой частей уравнения (2.34) можно проинтегрировать с использованием граничных условий:

$$\int_0^{\delta T} c_p \rho v_x \frac{\partial T}{\partial x} dy + c_p \rho v_y T \Big|_0^{\delta T} + \int_0^{\delta T} c_p T \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dy = \int_0^{\delta T} \rho v_x \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_\infty^2}{2} \right) dy - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_\omega \quad (2.36)$$

Учитывая, что:

$$\int_0^{\delta T} \rho v_x \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_\infty^2}{2} \right) dy = \int_0^{\delta T} \rho v_x \frac{\partial}{\partial x} (c_{p\infty} T_\infty) dy$$

И переставляя операции интегрирования и дифференцирования, получим:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta T} (c_{p\infty} T_\infty - c_p T) \rho v_x dy = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_\omega + \rho_\omega \cdot v_\omega \cdot (c_{p\infty} T_\infty - c_{p\infty} T_\omega) \quad (2.37)$$

Уравнение 2.37 отличается от интегрального уравнения пограничного слоя без вдува дополнительным членом, характеризующим молярный перенос теплоты вдуваемым газом. Аналогичным образом получается интегральное уравнение переноса массы:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta \omega} (W_\infty - W) \rho v_x dy = \rho_\omega D_{12} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right)_\omega - \rho_\omega v_\omega (W_\omega - W_\infty) \quad (2.38)$$

Полученные интегральные уравнения переноса используются для приближенных расчетов взаимосвязанного переноса теплоты и массы в пограничном слое.

Рассмотрим решение системы дифференциальных уравнений (2.26)-(2.29), предложенное Эккертом и Хартнеттом. Для решения были введены следующие упрощения:

- жидкость несжимаема;
- свойства компонентов не зависят от давления и температуры и мало отличаются друг от друга.

При рассматриваемых граничных условиях систему дифференциальных уравнений (2.26)-(2.29) можно привести к обыкновенным дифференциальным уравнениям, вводя функцию тока и используя следующие обозначения:

$$f = \frac{\psi}{\sqrt{\nu v_\infty x}}; \quad \xi = \frac{y}{x} \sqrt{v_\infty \cdot x / \nu}; \quad \theta = \frac{T - T_\omega}{T_\infty - T_\omega}; \quad \varphi = \frac{W_\omega - W}{W_\infty - W_\omega}; \quad (2.39)$$

Полагая, что  $v_\infty = v_c = const$ ;  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ , то показатели  $f, \theta, \varphi$  зависят только

от  $\xi$  то есть температура поверхности  $T_\omega$  и концентрация подаваемого ве-

щества  $W_\omega$  постоянны по поверхности пластины и не зависят от  $x$  получаем: уравнение переноса импульса

$$\frac{d^3 f}{d\xi^3} + \frac{1}{2} f \frac{d^2 f}{d\xi^2} = 0 \quad (2.40)$$

уравнение переноса массы

$$\frac{d^2 \varphi}{d\xi^2} + \frac{1}{2} Sc \cdot f \frac{d\varphi}{d\xi} = 0 \quad (2.41)$$

уравнение переноса теплоты

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + \frac{1}{2} Pr \cdot f \frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad (2.42)$$

При исследовании вдува, были выявлены существенные и важные для практического применения закономерности:

1. Вдув дестабилизирует пограничный слой, с ростом  $f_\omega$  происходит утолщение, урезание и искривление профилей, они принимают S-образную форму, Эммонс и Лей [116] показали, что при  $f \rightarrow 0.619$  решение уравнений пограничного слоя содержит условия  $\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)_\omega = 0$ , и  $v_x = 0$  при любом конечном  $y$ . При этом происходит отеснение пограничного слоя от поверхности пластины и, следовательно, система уравнений пограничного слоя при сильных вдувах не отражает истинной картины переноса в ламинарном потоке.
2. С ростом параметра вдува снижаются поверхностное трение и интенсивность теплообмена, то есть вдув может служить средством защиты поверхностей от нагрева (активно применяется в авиационной технике)[116]
3. При равенстве чисел  $Pr$  и  $Sc$  поперечный поток оказывает одинаковое воздействие на развитие и деформацию профилей температуры и кон-

центрации, а при соблюдении условий  $Pr=Sc=1$  наблюдается тройная аналогия (следствие из зависимостей (2.40)-(2.42))

Стоит отметить, что сложность непосредственных решений системы уравнений пограничного слоя заставляла искать ценой потери точности более простые пути получения результатов.

На основании имеющихся экспериментальных данных по вдуву различных газов в ламинарный пограничный слой плоской пористой пластины, омываемой воздушным потоком, в литературе приводят обобщенные соотношения для расчета локального теплообмена и поверхностного трения:

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = 1 - 2.08 \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} \frac{\rho_\omega v_\omega}{\rho_\infty \omega_\infty} \sqrt{Re_x} \quad (2.43)$$

$$\frac{q}{q_0} = 1 - 1.82 \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} \frac{\rho_\omega v_\omega}{\rho_\infty \omega_\infty} \sqrt{Re_x} \quad (2.44)$$

Величины  $\rho$  и  $Re_x$  вычисляются по определяющей температуре  $T^*$

$$T^* = T_\infty + 0.5(T_\omega - T_\infty) + 0.22(T_{r0} - T_\infty) \quad (2.46)$$

В результате наших теоретических исследований для православных храмов были получены следующие соотношения для расчета локального теплообмена и поверхностного трения при ламинарном режиме:

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = 1 - 2.08 \frac{\rho_\omega v_\omega}{\rho_\infty \omega_\infty} \sqrt{Re_x} \quad \frac{q}{q_0} = 1 - 1.82 \frac{\rho_\omega v_\omega}{\rho_\infty \omega_\infty} \sqrt{Re_x} \quad (2.46)$$

Для турбулентного режима при вдувах (задача на вдув неконденсирующихся газов) были получены следующие эмпирические соотношения:

$$Nu_x = 0,0289 Re_x^{0.8} Pr^{0.4} \exp(-0,36b_H) \quad (2.47)$$

$$(Nu_x)_m = 0,0195 Re_x^{0.8} Sc^{-0.6} b_0 \chi_\omega^{-1} \quad (2.48)$$

где  $b_H$  - относительный энтальпийный параметр массообмена;  $b_0$  - относительный динамический параметр массообмена;  $\chi$  - мольная или объёмная концентрация охладителя.

## 2.5. Альтернативные решения задач на вдув.

Задачи на вдув широко распространены в авиационной и ракетной технике, поскольку часто возникает необходимость защитить стенки конструкции от воздействия высокотемпературного газового потока.

Такая техника защищается от перегрева жаростойкими, оплавляющимися или сублимирующими покрытиями или посредством конвективного, пористого, пленочного и заградительного охлаждения. Эти задачи подробно рассмотрены в [23].

Но поскольку мы имеем дело с описанием движения воздушного потока вдоль внутренней поверхности наружного ограждения, нам необходимо рассмотреть лишь те варианты, из вышеперечисленных, которые могут удовлетворять заданным условиям. Таким образом, из рассмотрения выпадают различные типы теплоизолирующих покрытий.

Однако внимания заслуживает пористая система охлаждения, представляющая собой омываемую горячим газом стенку, выполненную из пористого материала, через которую в направлении горячего газа продавливается газ охладитель или жидкость. При прохождении через поры охладитель получает теплоту от стенки, а выйдя на поверхность, ухудшает интенсивность теплообмена между горячим газом и стенкой. С одной стороны условия перехода теплоты от горячего газа к поверхности стенки ухудшаются, с другой стороны получаемая стенкой теплота выносится обратно в поток. Это приводит к снижению температуры стенки. При рассмотрении данной задачи применительно к православным храмам, стенкой является внутренняя поверхность оконного проема, горячим газом - восходящий конвективный поток, а вдуваемый газ или жидкость – холодный наружный воздух, проникающий в помещение храма через оконный проем.

Поскольку в космонавтике речь идет о высоких температурах, имеет место различие между поведением газовой фазы (эффузионное охлаждение) и жидкой фазы (конденсатное охлаждение). Эффузионное охлаждение является

наиболее подходящим для заданных условий, поэтому в дальнейшем будет рассмотрено лишь газовое охлаждение через пористую стенку. Однако высокоскоростное движение газового потока и радиационно-конвективный теплообмен также не подходят под заданные условия.

Наиболее оптимально по отношению к заданным в исследовании условиям будет решение задачи, по условиям которой, интенсивность внутри пор бесконечно велика, и потому температурные поля стенки и протекающего по ней охладителя совпадают, а подходящий к холодной поверхности конвективный поток охладителя получает теплоту только путем теплопроводности.

В сечении пористой стенки, отстоящем от начала координат на расстоянии  $x$  температура стенки и охладителя  $t$ , а плотность теплового потока равна:

$$q_x = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (2.49)$$

где  $\lambda$  коэффициент теплопроводности пористого материала.

Значение температуры в сечении  $x+dx$  можно найти разложением  $t$  в ряд Тейлора. Ограничиваясь двумя членами выражение примет следующий вид.

$$t_{x+dx} = t + \frac{dt}{dx} dx \quad (2.50)$$

Следовательно подставляя (2.49) в (2.50):

$$q_{x+dx} = -\lambda \frac{d}{dx} \left( t + \frac{dt}{dx} dx \right) = -\lambda \left( \frac{dt}{dx} + \frac{d^2 t}{dx^2} dx \right)$$

Разность тепловых потоков в сечениях  $x$  и  $x+dx$  расходуется на повышение энтальпии охладителя

$$-\lambda \frac{dt}{dx} + \lambda \left( \frac{dt}{dx} + \frac{d^2 t}{dx^2} dx \right) = g_0^* c_{p0} dt \quad (2.51)$$

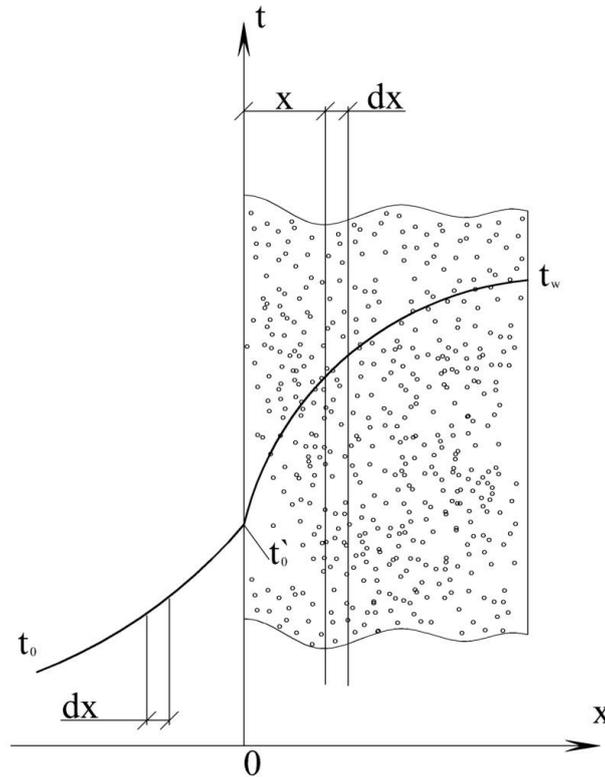


Рис. 2.4 Графическая иллюстрация к выводу формул при альтернативном решении задач на вдув (пористое охлаждение).

$g_0^*$  - плотность массового потока охладителя, необходимая для обеспечения выбранной температур стенки,  $c_{p0}$  - теплоемкость охладителя.

Уравнение (2.51) приводится к виду:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{g_0^* c_{p0}}{\lambda} \frac{dt}{dx} = 0 \quad (2.52)$$

Произведем замену  $\xi = \frac{g_0^* c_{p0}}{\lambda} x$  и получим следующие решения уравнения:

$$t = C_1 + C_2 e^{\xi x} \quad (2.53)$$

Условия на границах стенки при  $x=0; t=\hat{t}_\omega$ ; при  $x=\delta; t=t_\omega$  позволяют определить константы интегрирования

$$C_1 = \hat{t}_\omega - \frac{\hat{t}_\omega - t_\omega}{1 - e^{\xi \delta}}; C_2 = \frac{\hat{t}_\omega - t_\omega}{1 - e^{\xi \delta}};$$

Подставляя константы интегрирования в уравнение (2.52) мы получим:

$$t = t'_\omega + \frac{t_\omega - t'_\omega}{(e^{\xi\delta} - 1)} (e^{\xi\delta} - 1) \quad (2.54)$$

При рассмотрении баланса теплоты для слоя охладителя толщиной  $dx$  при  $x < 0$  позволяет записать дифференциальное уравнение для температуры охладителя

$$\frac{d^2 t'}{dx^2} - \zeta \frac{dt'}{dx} = 0 \quad (2.55)$$

Однако в данном уравнении  $\zeta = \frac{g_0^* c_{p0}}{\lambda_0}$ ,

где  $\lambda_0$  - коэффициент теплопроводности охладителя.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$t' = C_3 + C_4 e^{\xi x}$$

Граничные условия формулируются следующим образом:

$$\text{При } x = 0; \lambda_0 \frac{dt'}{dx} = \lambda \frac{dt}{dx}; \text{ при } x = -\infty; t' = t_0$$

Они позволяют найти константы интегрирования

$$C_3 = t_0; C_4 = \frac{t_\omega - t'_\omega}{e^{\xi\delta} - 1}$$

Подстановка констант в уравнение (2.55)

$$t' = t_0 + \frac{t_\omega - t'_\omega}{e^{\xi\delta} - 1} e^{\xi x} \quad (2.56)$$

При  $x = 0$ ;  $t' = t'_\omega$  с помощью этого условия из уравнения (2.56) получается

$$t'_\omega = t_0 + \frac{t_\omega - t_0}{e^{\xi\delta}}$$

Это выражение позволяет исключить из (2.54) и получить окончательное выражение для температурного поля

$$\frac{t - t_0}{t_\omega - t_0} = e^{-\xi\delta(1 - \frac{x}{\delta})} \quad (2.57)$$

Таким же образом можно провести параллели между конструкциями православных храмов и другими системами охлаждения.

При пленочном охлаждении защищаемая стенка покрывается пленкой жидкости, которая подается через одну или несколько щелей выполненных на некотором расстоянии друг от друга и растекается по поверхности. В храмах между окнами и оконными проемами также имеются неплотности, щели и зазоры, через которые холодный наружный воздух поступает в помещения храма. Однако при пленочном ограждении речь идет о совершенно других диапазонах скоростей, и выделяется так называемая критическая скорость, после достижения которой струя отделяется от охлаждаемой поверхности и может вернуться к ней на некотором расстоянии за щелью или совсем не попадает на нее. Также полностью исключается возможность образования волн на поверхности пленки, приводящих к потере ее устойчивости, характеризующейся уносом капель не испаренной жидкости газовым потоком.

Таким образом, при условиях, созданных в православных храмах интересным будет лишь уравнение теплового баланса при устойчивом движении пленки:

$$\frac{\alpha}{c\rho_{\omega}}(I_r - I_{\omega}) \cdot l \cdot h = G_0 \cdot \Delta i_0 \quad , \quad (2.58)$$

где:  $h$  – ширина пленки,  $l$  – длина пленки,  $G_0$  – массовый расход охладителя через щель,  $\Delta i_0 = c\Delta t + r$  – изменение энтальпии охладителя в системе.

Варианты с загородительным и комбинированным (стенка омывается охлаждающим газом с двух сторон) охлаждением не могут быть использованы для православных храмов, поскольку поток охлаждающего газа поступает не со стороны стенки, а из плоскости перпендикулярной ей, чаще всего по касательной к тепловому потоку нагретой стенки или под углом 15-30°.

## **Выводы по второй главе**

1. Согласно проведенным исследованиям температура воздуха над отопительным прибором составила 19,6-20,1°C, скорость воздуха 0,15-0,32 м/с в случае когда над отопительным прибором расположен оконный проем. Над отопительным прибором у глухой стены температура воздуха составила 21,5 °С, скорость воздуха – 0,37 м/с.

2. При описании движения восходящего конвективного потока вдоль внутренней поверхности наружного ограждения удобнее делить конструкцию на участки. При большом количестве световых проемов над отопительными приборами, стоит чередовать результаты, полученные при решении рассмотренным задач. За исходные данные принимаются значения, полученные над отопительным прибором.

3. Стоит отметить немаловажную роль в акселерации конвективного потока и выделения большого количества теплоты прихожан и горящих свечей. Необходимые данные могут быть взяты в следующих литературных источниках.

4. Температура воздуха около свечей достигает 40-50 °С, однако уже на расстоянии 0,5 м над уровнем горения свечи остывает до 18 °С (зимний период), смешиваясь с воздухом внутри помещения. Скорость воздуха составляет 0,15 м/с.

5. В барабане храма температура воздуха различается в зависимости от близости к оконным проемам: в центре составляет 19,8 °С и вблизи закрытых оконных проемов составляет 17,1-17,3 °С. Скорость воздуха варьируется от 0,14-0,32 м/с.

## Глава 3. Экспериментальные исследования аэродинамики православных храмов

### 3.1. Критерии подобия

Исследование внешней аэродинамики зданий, в том числе православных храмов производится в аэродинамических трубах, представляющих собой установки, создающие поток воздуха или газа для проведения экспериментов с целью изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.

Аэродинамические коэффициенты  $c_v$ , нахождение которых является целью аэродинамических исследований, представляют собой величину, определяющую степень восприятия динамического давления набегающего потока на поверхности обтекаемого потоком тела. Эта безразмерная величина, равная удвоенному значению числа Эйлера:

$$c_v = 2 \cdot Eu \quad (3.1)$$

Физический смысл числа Эйлера аналогичен физическому смыслу аэродинамического коэффициента:

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot v^2} \quad (3.2)$$

где:  $P$  - статическое давление на поверхности модели, Па;

$v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$\rho$  - плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>.

В честь известного немецкого физика Людвиг Прандтля был назван один из критериев подобия – число Прандтля  $Pr$ , учитывающее разницу между физическими свойствами газов натурального и модельного течений:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.3)$$

где:  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Однако отличие воздушного потока, которым обдуваются натурные объекты и модели незначительно, что позволяет не учитывать пренебрежимо малое влияние данного критерия подобия.

Обращаясь к остальным критериям подобия, в строгом соответствии с которыми должны изготавливаться модели для аэродинамических исследований, необходимо определить какие из них окажут значительное влияние на искомые величины, а какими можно пренебречь.

Таким примером является число Маха-Майевского (или число Бэрстоу), учитывающее во сколько раз скорость потока будет отличаться от скорости звука (характеризует относительную величину воздействия сжимаемости на течение газа):

$$Ma = \frac{v}{a_{зв}} \quad (3.4)$$

где:  $v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$a_{зв}$  - скорость звука, м/с.

Этот критерий будет оказывать значительное влияние на испытание моделей сверхзвуковых самолетов, однако для православных храмов, испытание которых происходит в дозвуковых аэродинамических трубах, где скорость не превышает 15-20 м/с, влияние числа Маха-Маевского будет незначительно.

Учитывая тот факт, что в результате аэродинамических исследований православных храмов необходимо определить статическое давление в характерных точках модели, по которому впоследствии производят расчет аэродинамических коэффициентов необходимо оценить значения критериев, которые не будут оказывать влияния на нахождение аэродинамических коэффициентов, чтобы ими можно было пренебречь.

Таким образом, числом Фруда, имеющим существенное влияние, при значительном соотношении между силами тяжести и инерционными силами в потоке жидкости, можно пренебречь, так как влияние веса газа при испытании православных храмов чрезвычайно мало:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l} \quad (3.5)$$

где:  $v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$l$  - характерный размер, м.

Не оказывает влияние на статическое давление, а, следовательно, и на аэродинамические коэффициенты и число Струхала, применяемое при изучении нестационарных процессов:

$$Sh = \frac{v \cdot T}{l} \quad (3.6)$$

где:  $T$  - время, с;

$v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$l$  - характерный размер, м.

Обязательными условиями подобия для православных храмов, при выполнении модели будут обеспечение постоянства масштабов (линейного, массового) и упругости. Для того, чтобы достичь постоянства линейного масштаба необходимо удовлетворить условиям геометрического подобия:

$$\frac{L_0}{l_{mod}} = const \quad (3.7)$$

где:  $L_0$  - геометрический размер натурального объекта, м.

$l_{mod}$  - соответствующий натурному размер модели, м.

Необходимо обеспечить пропорциональность всех линейных размеров модели и натурности, а так же равенство их соответственных углов.

Для обеспечения постоянства массового масштаба необходимым условием является подобие сил инерции. Силу упругости у модели и натурности учитывает число Коши:

$$Ca = \frac{v^2 \cdot \rho}{E} \quad (3.8)$$

где:  $v$  - скорость воздушного потока, м/с;

$\rho$  - плотность воздушного потока, кг/м<sup>3</sup>;

$E$  - модуль упругости Юнга материала модели, Па.

Следовательно, модели православных храмов необходимо выполнять из такого материала, который будет удовлетворять приведенным требованиям. При выполнении макетов из плотной бумаги, для придания упругости необходимо заполнять внутреннюю полость быстротвердеющим пенным материалом, либо как в данном исследовании выполнить модели из пластика толщиной 2мм.

Особое внимание стоит обратить на обеспечение подобия при обтекании, то есть удовлетворению критерию Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v_1 \cdot l_1}{\nu} = \frac{v_2 \cdot l_2}{\nu} \quad (3.9)$$

где:  $v_1$  - средняя скорость ветра, м/с;

$l_1$  - характерный размер натурального объекта, м.

$v_2$  - скорость воздушного потока в аэродинамической трубе, м/с;

$l_2$  - размер модели, аналогичный натурному, м.

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

Согласно этому критерию, при уменьшении размера модели в несколько раз, необходимо увеличить скорость во столько же раз. Учитывая тот факт, что аэродинамические трубы способны продувать только малые модели (масштаб 1:50; 1:100) то для сохранения числа Рейнольдса необходимо было бы создать достаточно большие скорости воздушного потока, в данном случае превышающие среднюю скорость ветра в районе постройки сооружения в 50 и в 100 раз соответственно. Следовательно, для обеспечения таких скоростей необходимо установить очень мощный вентилятор в аэродинамическую трубу, который создавал бы воздушный поток, отличающийся по своим физическим характеристикам от воздушного потока в реальных условиях.

Но если считать воздух несжимаемым, то характер обтекания здания с острыми кромками не зависит от числа Рейнольдса, так как на зданиях с ост-

рыми кромками срыв струй происходит непосредственно за острой кромкой. Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные Эйфелем, Н.А. Рыниным, В.В. Батуриным, П.Н. Каменевым, К.А. Бункиным и А.М. Черемухиным, Э.И. Ретгером и др. [9, 28,80 ,151,152,153,154] доказали, что аэродинамические коэффициенты натуральных зданий и их моделей практически равны между собой, что означает независимость аэродинамических характеристик от скорости воздушного потока и масштаба модели или их автомодельность (независимость характера движения от определяющего процесс критерия) в отношении критерия Рейнольдса.

### **3.2. Планирование эксперимента**

Планирование эксперимента – это выбор числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Основные этапы планирования эксперимента:

1. Минимизация числа опытов, времени их выполнения.
2. Реализация специальных планов эксперимента, предусматривающих одновременное варьирование всеми переменными.
3. Использование аппарата математической статистики для формализации экспериментов и принятия обоснованных решений после каждой их серии.

Одним из условий применения моделей для продувки в аэродинамической трубе является ограничение соотношения максимальных размеров модели и элементов рабочей части аэродинамической трубы: модель должна быть настолько велика, насколько это совместимо с необходимостью избегать нежелательного влияния границ рабочей части трубы (миделевое сечение), то есть эффекта загромождения моделью поперечного сечения потока. Трёхмерные модели, испытываемые на малых скоростях, не должны иметь максимальный размер, превосходящий 0,7 ширины рабочей части [146].

Естественной конвекции присущи особенности, отличающие её от других процессов течения и теплообмена, поэтому при изучении естественной конвекции часто приходится прибегать к специальным методам.

Как и в большинстве экспериментальных исследований, при изучении естественной конвекции возникают главным образом два основных вопроса, связанные с проведением экспериментов. Первый относится к методике измерений и измерительному оборудованию, то есть к способам создания течений и другим аналогичным проблемам, связанным с обтеканием вертикальной стенки с изменяющимися параметрами по высоте. При проектировании установки, предназначенной для экспериментального исследования поставленной задачи, необходимо использовать обширную информацию, представленную в [64].

Основной целью измерений при естественной конвекции является определение параметров течения и теплообмена. Для этого требуется измерить поля скорости и температуры и тепловые потоки. Благодаря наличию градиентов параметров течения и градиентов плотности, возникающих в поле температуры, для изучения характеристик переноса тепла можно применять также различные методы визуализации, как качественные, так и количественные.

При проведении экспериментов считается, что выполняются следующие допущения: 1) случайные ошибки наблюдений имеют нормальное распределение; 2) факторы влияют только на изменение средних значений, а дисперсия наблюдений остается постоянной; 3) эксперименты равноточны.

При планировании по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Необходимое количество опытов  $N$  при ПФЭ определяется по формуле [97]:

$$N=n^k, \quad (3.10)$$

где  $n$  – количество уровней;

$k$  – количество факторов.

Если эксперименты проводятся только на двух уровнях, при двух значениях факторов и при этом в процессе эксперимента осуществляются все воз-

возможные комбинации из  $k$  факторов, то постановка опытов по такому плану называется полным факторным экспериментом типа  $2^k$ .

Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по данному технологическому параметру. В отечественной и зарубежной литературе [64, 97, 116, 117] для обработки и обобщения экспериментальных данных при изучении процессов тепло- и массообмена в условиях испарения воды на поверхности стены получены зависимости из анализа системы уравнений движения, теплопроводности, диффузии, баланса на границе раздела фаз.

В нашем случае при постановке экспериментов по нахождению аэродинамических коэффициентов необходимо придерживаться равенства критериев  $Re$  и  $Eu$ . Помимо этого в широких пределах значений критерия  $Re$  процесс обтекания здания воздушным потоком становится автомодельным относительно критерия  $Re$  [145, 196, 197]. При постановке экспериментов по нахождению температурных и скоростных полей около внутренних поверхностей наружных ограждений основными критериями на начальном участке развития конвективной струи являются критерии  $Pr$  и  $Gr$ . По мере удаления от передней кромки вниз по потоку постепенно возрастает роль критерия  $Re$ . Также удаление воздуха сопровождается осушкой внутренней поверхности ограждающих конструкций здания и зависит от условий теплообмена  $Nu$  и массообмена  $Nu_D$ , гидродинамических условий движения потока воздуха и от степени интенсивности испарения воды  $K_x$ , содержащейся на поверхности стены.

Чтобы оценить какое влияние оказывает каждый из факторов на энтальпию удаляемого воздуха  $I_{yx}$ , которая характеризуется температурой  $t_{yx}$  и влажностью  $d_{yx}$  удаляемого воздуха, был спланирован двухуровневый четырехфакторный эксперимент. Задача планирования будет иметь вид:  $I_{yx} = f(Re, Nu, Nu_D, K_x)$ , где  $I_{yx}$  – параметр оптимизации, а  $f(Re, Nu, Nu_D, K_x)$  – функция отклика.

Энтальпия приточного к осушаемой стене воздуха определяется по  $I-d$  диаграмме. Она является заданной величиной, так как температура и влагосо-

держание определяются по расчетным параметрам наружного воздуха в холодный и переходный периоды года и тепловой мощности воздухонагревателя приточной установки, а также по расчетным параметрам наружного воздуха в теплый период.

Критерий Архимеда  $Ar$  для диапазона рассматриваемых величин изменяется незначительно, поэтому он может быть исключен из приведенного выражения. Критерии Прандтля  $Pr$  и  $Pr_D$  являются постоянными величинами.

Для составления уравнения регрессии и определения значений коэффициентов выше приведенного выражения в линейности уравнений при использовании полного факторного эксперимента  $2^4$  необходимо выполнить 16 опытов.

Для сокращения количества опытов была применена полуреплика от полного факторного плана. Каждый опыт проводился четыре раза. План эксперимента представлен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4 = X_1 * X_3$	$X_1 * X_2$	$X_2 * X_3$	$X_2 * X_4$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	+	-	-	-
3	+	-	-	+	-	+	-	+
4	+	-	+	+	-	-	+	-
5	+	+	+	-	-	+	-	-
6	+	+	-	-	-	-	+	+
7	+	-	-	-	+	+	+	-
8	+	-	+	-	+	-	-	+

Построим систему смешения оценок для получения  $2^{4-1}$  с генерирующим соотношением 4, тогда линейные эффекты оказываются смешанными с некоторыми парными взаимодействиями, но часть парных взаимодействий определяются независимо друг от друга. Определяющий контраст при этом будет иметь вид  $1 = X_1 X_2 X_3$ . Используя данную дробную реплику, можно оценить коэффициенты уравнения регрессии:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 + X_2 + b_{23} X_2 + X_3 + b_{24} X_2 + X_4 .$$

(3.11)

Подставим факторы в безразмерной системе координат.

$$X = (\bar{A} - \bar{A}_0) / \Delta \bar{A} , \quad (3.12)$$

где  $\bar{A}$  – значение управляемой переменной;

$\Delta \bar{A}$  – шаг варьирования;  $\bar{A}_0$  – значение этой переменной в центре плана.

Тогда  $X_1 = (Re - Re_0) / \Delta Re = (Re - 5245) / 4395,$

$$X_2 = (Nu - Nu_0) / \Delta Nu = (Nu - 201) / 169,$$

$$X_3 = (Nu - Nu_{D0}) / \Delta Nu_D = (Nu_D - 142,5) / 127,5,$$

$$X_4 = (K_X - K_{X0}) / \Delta K_X = (K_X - 0,6) / 0,1.$$

Центр плана по Re

$$Re_0 = (Re_{\max} + Re_{\min}) / 2 = (9640 + 850) / 2 = 5245.$$

Интервал варьирования

$$\Delta Re = (Re_{\max} - Re_{\min}) / 2 = (9640 - 850) / 2 = 4395.$$

Центра плана по Nu

$$Nu_0 = (Nu_{\max} + Nu_{\min}) / 2 = (370 + 32) / 2 = 201.$$

Интервал варьирования

$$\Delta Nu = (Nu_{\max} - Nu_{\min}) / 2 = (370 - 32) / 2 = 169.$$

Центр плана по  $Nu_D$

$$Nu_{D0} = (Nu_{D\max} + Nu_{D\min}) / 2 = (270 + 15) / 2 = 142,5.$$

Интервал варьирования

$$\Delta Nu_D = (Nu_{D\max} - Nu_{D\min}) / 2 = (270 - 15) / 2 = 127,5.$$

Центр плана по  $K_X$

$$K_{X0} = (K_{X\max} + K_{X\min}) / 2 = (0,7 + 0,5) / 2 = 0,6.$$

$$\Delta K_X = (K_{X\max} - K_{X\min}) / 2 = (0,7 - 0,5) / 2 = 0,1.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Условия эксперимента

Фактор	Re	Nu	Nu <sub>D</sub>	K <sub>x</sub>
Центр плана	5245	201	142,5	0,6
Интервал варьирования	4395	169	127,5	0,1
Верхний уровень (+)	9640	370	270	0,7
Нижний уровень (-)	850	32	15	0,5

План типа  $2^4$  обладает следующими свойствами:

1. Ортогональность  $\sum_{u=1}^N X_{iu}X_{ju}=0; i,j=1, 2, \dots, n$

при  $i \neq j$ , что делает все коэффициенты регрессии некоррелированными между собой и, следовательно, позволяет определять их независимо друг от друга и снижает вычислительные трудности.

2. Симметричность относительно центра эксперимента

$$\sum_{u=1}^N X_{iu}=0; i,j=1, 2, \dots, n.$$

3. Условие нормировки  $\sum_{u=1}^N X_{iu}^2=N; i,j=1, 2, \dots, n..$

4. Рентабельность. Это свойство позволяющее получить уравнение регрессии, обладающее одинаковой точностью предсказания значения параметра оптимизации в любом направлении на одинаковом расстоянии от центра эксперимента.

Для проверки однородности дисперсии в каждой серии параллельных опытов определялась построчная дисперсия:

$$S_u^2=1/(m-1) \sum_{k=1}^m (Y_{uk}-\bar{Y}_u)^2, \quad (3.13)$$

где  $m$  – число параллельных опытов;  $Y_{uk}$  – величина входного параметра в каждом параллельном опыте;  $\bar{Y}_u$  – среднеарифметическая величина входного параметра в данной серии.

Величина критерия Кохрена определяется по зависимости:

$$G_p = S^2_{u \max} / \sum_{u=1}^N S^2_u \quad (3.14)$$

Проверяем гипотезу однородности дисперсий  $G_p < GT$ , где  $G_p, GT$  – расчетное и табличное значение критерия Кохрена, соответственно.

Расчет ошибки опыта выполняется по соотношению:

$$S^2_0 = 1 / [N \cdot (m-1)] \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{u=1}^m (Y_{uk} - \bar{Y}_u) \quad (3.15)$$

Ошибка коэффициентов регрессии

$$S_{2bi} = S_{20} / (N \cdot M), \quad (3.16)$$

где  $M$  – число параллельных экспериментов,

$N$  – число опытов.

Это позволило оценить значимость коэффициентов регрессии, которые рассчитывались по уравнению:

$$b_i = 1/N \sum_{u=1}^N X_{ij} Y_j \quad (3.17)$$

Ортогональность матрицы позволяет определить значимость каждого из коэффициентов по критерию Стьюдента. Для этого определяем соотношения  $J_{bi} = b_i / S_{bi}$  и сравниваем с табличной величиной критерия Стьюдента  $J_a$  для  $\alpha = 0,01$ , где  $\alpha$  – уровень значимости.

Доверительный интервал коэффициента регрессии

$$\Delta b_i = \pm S_{bi} J_a \quad (3.18)$$

Абсолютная величина искомой критериальной зависимости должна быть больше доверительного интервала, тогда коэффициент значим:

$$|b_i| > |\Delta b_i| \quad (3.19)$$

Для проверки гипотезы об адекватности полученного уравнения выполнялись расчеты дисперсий  $S_{2ад}$ , характеризующих отклонение экспериментальных точек  $\bar{Y}_u$  от найденных по уравнению  $\hat{Y}$ .

$$S_{2ад} = 1 / (N - J) \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y})^2, \quad (3.20)$$

для степени свободы  $f=N-J$ , где  $J$  - число незначимых коэффициентов.

На этом этапе статистического анализа уравнения пользовались критерием Фишера:

$$F_p = S_{2ад} / S_{20} \quad (3.21)$$

Если  $F_T > F_p$ , то уравнение адекватно описывает экспериментальные данные, где  $F_T, F_p$  – табличное и расчетное значение критерия Фишера.

Однако при проведении экспериментов по определению скоростных и температурных полей около внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций для культовых сооружений одним из основных препятствий повышения достоверности получаемых результатов является значительная тепловая инерционность непрозрачных ограждений и незначительная тепловая инерционность прозрачных. Другой особенностью являются архитектурные решения наружных ограждающих конструкций культовых сооружений. Указанные причины затрудняют, а в некоторых случаях делают невозможным моделирование процессов теплообмена для условий внутренней задачи.

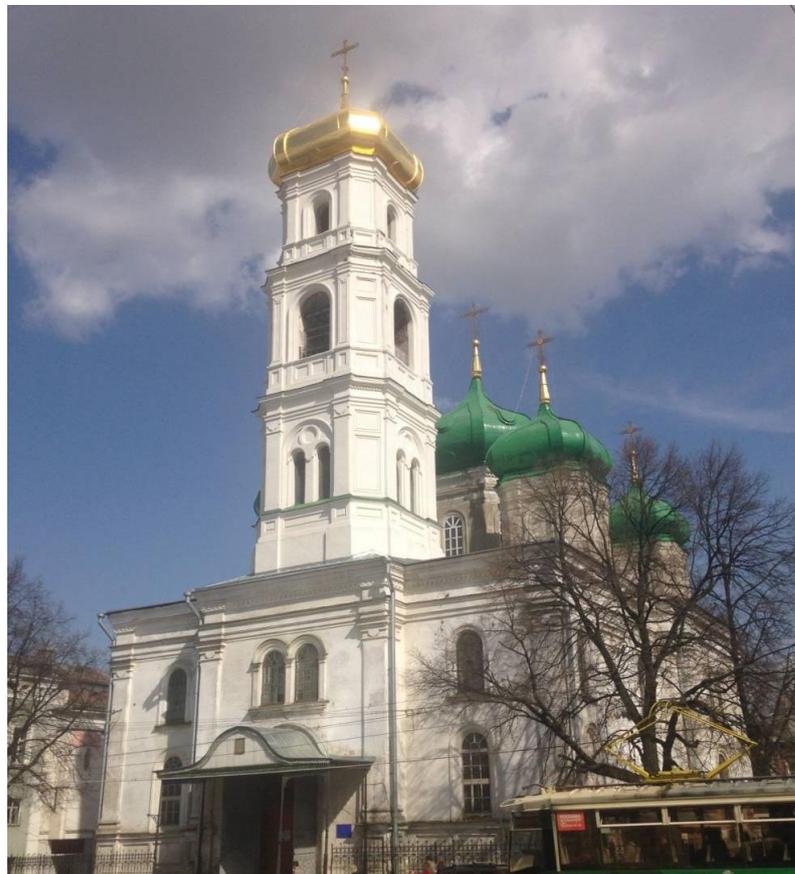


Рис 3.1. Храм Вознесения Господня

Выявленные выше особенности планирования эксперимента для конструкций культовых сооружений ограничивают, а часто и, вообще, не допускают проведения исследований в лабораторных условиях. Одновременно с указанными особенностями возникают сложности создания переменных наружных климатических факторов, характерных для реальных условий эксплуатации культовых сооружений по регионам страны, и их системного анализа.

Поэтому экспериментальные исследования по определению скоростных и температурных полей проводились в натуральных условиях в помещениях храма Вознесения Господня на ул. Ильинская в г. Нижнем Новгороде рис 3.1.

### **3.3. Методика экспериментальных исследований**

Для изучения закономерностей тепло- и массообмена на внутренних поверхностях уникальных зданий и сооружений необходимо знать распределение полей скоростей и температуры на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, а также распределение значений аэродинамических коэффициентов  $c_v$  на наружных поверхностях ограждающих конструкций.

Экспериментальная часть исследований состоит из следующих этапов:

1. Определение аэродинамических характеристик конструкций снаружи здания храма.
2. Определение скоростных полей около внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций.
3. Определение температурных полей на внутренних поверхностях ограждающих конструкций.

Аэродинамические характеристики сооружений простейших конфигураций приводятся в справочной и нормативной литературе [9, 27, 164]. Однако элементы ограждающих конструкций уникальных зданий и сооружений представлены в [164] не в полной мере. Согласно [164] аэродинамические коэффи-

циенты допускается принимать по данным результатов продувок моделей конструкций в аэродинамической трубе.

Лабораторная установка, на которой проводятся эксперименты по исследованию внешней аэродинамики различных зданий, в том числе и культовых сооружений, представляет собой закольцованную аэродинамическую трубу с открытой рабочей частью (рис. 3.2). Диаметр воздуховодов аэродинамической трубы равен 1000 мм, нагнетатель мощностью 3кВт обеспечивает расход воздуха 14400 м<sup>3</sup>/ч. Измерение скорости воздушного потока в рабочей области производится с помощью чашечного анемометра с диапазоном измерения средней скорости воздуха от 1 до 20 м/с.

Соблюдение значения миделевого сечения, т.е. отношения площади проекции исследуемой модели на площадь поперечной части аэродинамической трубы к площади поперечного сечения рабочей части трубы, в определенных пределах так же является необходимым условием.

На рассматриваемой экспериментальной установке высота исследуемой модели принимается от 100 до 700 мм.

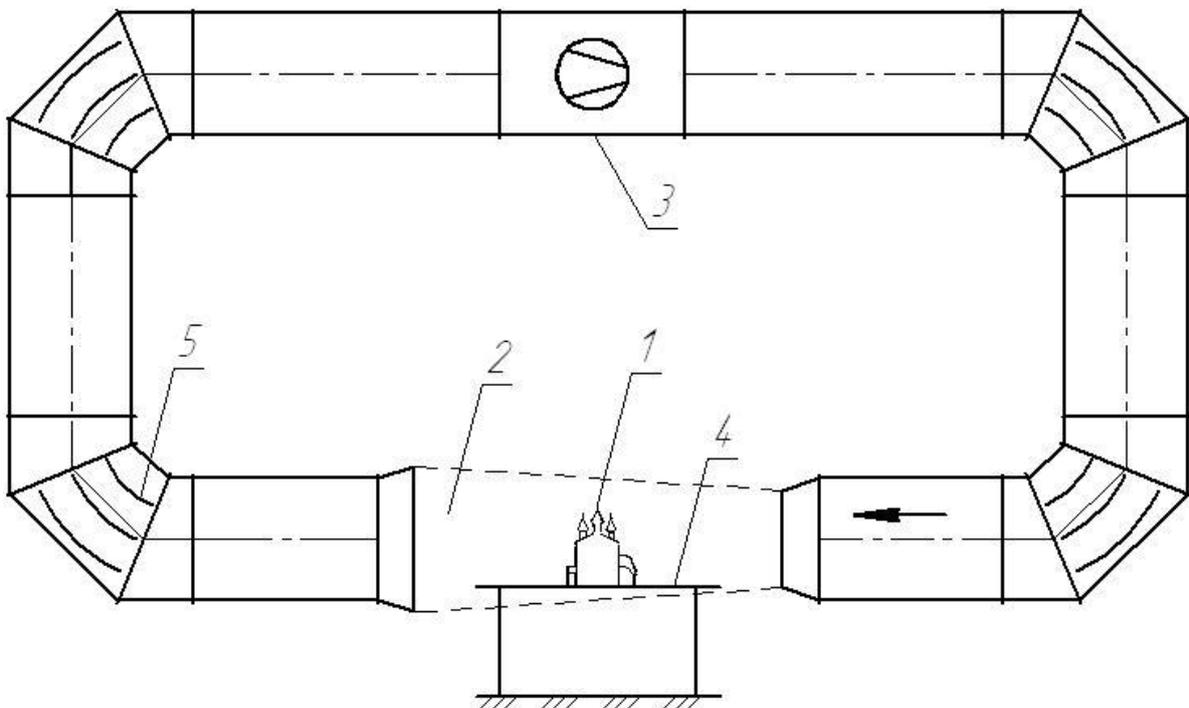


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемая модель объекта; 2 – рабочая область аэродинамической трубы; 3 – осевой вентилятор; 4 – подставка под модель здания; 5 – направляющие ребра

Благодаря работам Э. И. Реттера [151,152,153,154] стали возможными испытания сплошных моделей, так как его исследования показали, что аэродинамические коэффициенты, полученные при испытании таких моделей равны коэффициентам таких же моделей с открытыми проемами. Сами модели изготавливаются из плотной бумаги, внутренняя полость которых для обеспечения жесткости и прочности заполняется быстротвердеющим пенным материалом. В места расположения оконных проемов (характерных точках модели) размещаются 5 мм трубки. Для измерения статического давления на поверхности модели здания в этих точках используют микроманометр, присоединяющийся к медным трубкам с помощью резиновых полых жгутов, которыми дренирована испытываемая модель здания в характерных точках. Измерения для каждой точки производятся для восьми направлений воздушного потока: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ.



Рис. 3.3. Проведение испытаний на аэродинамической трубе



Рис. 3.4. Фиксация значений статических давлений

По результатам исследований строится аэродинамическая характеристика здания в виде диаграммы распределения давлений ветра на поверхности изучаемого сооружения при различных направлениях ветрового потока.

При малых скоростях воздушного потока, ввиду малого числового значения статического давления, в потоке воздуха в рабочей части аэродинамической трубы, для упрощения эксперимента избыточное давление в исследуемых точках модели принимается равным аэродинамическому, так как величина статического давления потока составляет около 1% величины динамического давления потока, что не выходит за допустимые пределы погрешностей в экспериментах.

Таким образом, аэродинамический коэффициент определяет ту долю скоростного давления, которая переходит в статическое давление [151].

Аэродинамический коэффициент может быть величиной как положительной, так и отрицательной. Из закона сохранения энергии вытекает, что величина аэродинамического коэффициента не может быть больше  $\pm 1$ . Однако,

если не подвергать сомнению выводы в ряде учебных пособий, то «значения отрицательных величин аэродинамических коэффициентов может быть и больше единицы, так как местное увеличение скорости отдельных струек воздуха, вызванное общим сужением потока, может превышать общую скорость потока  $v_0$ ». Величина аэродинамического коэффициента имеет положительное значение для поверхностей, расположенных на наветренной стороне зданий, а для поверхностей, испытывающих подсосывающее действие ветра (заветренная сторона), этот коэффициент имеет отрицательное значение  $c_v = -3$  [151].

Однако закон сохранения энергии позволяет оперировать значением величины аэродинамического коэффициента в пределах  $\pm 1$ .

### **3.4 Расположение характерных точек исследования в моделях православных храмов**

Первоначально в качестве эталонного образца и для возможной корректировки исследований был испытан объект, состоящий из геометрических фигур – квадратов, прямоугольников, цилиндров и т.д., в совокупности являющийся упрощенным подобием православного храма (далее по тексту «Геометрический храм»). Всего было выполнено 25 отверстий: в нижнем ярусе окон, приточные отверстия и в верхних ярусах окон – вытяжные.

Были также выполнены исследованные модели православных храмов, в соответствии с миделевым сечением аэродинамической трубы, однако их размеры не позволяли выполнить замеры во всех необходимых точках. Речь идет об оконных проемах в барабанах храмов, в которые при таком масштабе не помещались штуцеры для замера давлений. Поэтому были изготовлены более крупные модели в строгом геометрическом соответствии с натурными объектами (достигнуто с помощью использования работ [7,52,53,200,201], а также 3D моделям памятников на картах Google), размеры которых позволили выполнить характерные точки исследования статического давления во всех необходимых

областях. На уменьшенных моделях храмов замерялся общий контур обтекания, а на увеличенных моделях проводились исследования всех характерных точек, рассматривая каждый храм по частям.



Рис. 3.5. Исследование «Геометрического» храма.

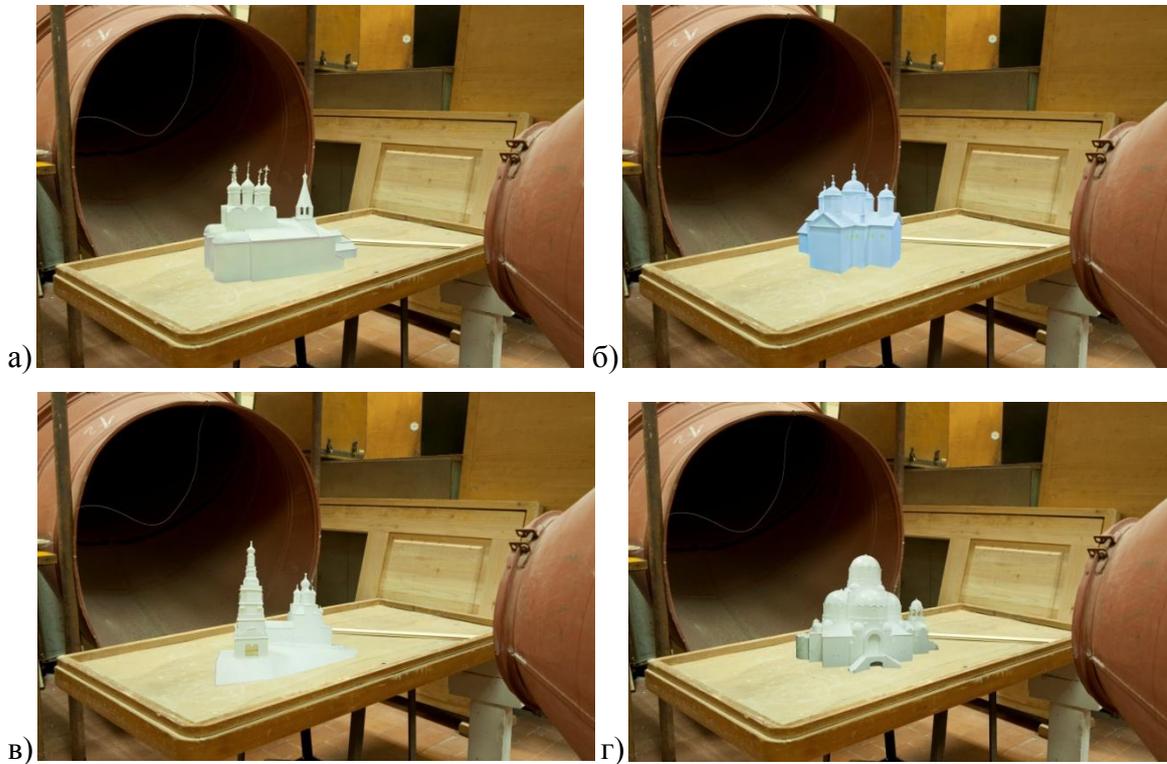


Рис. 3.6. Уменьшенные модели храмов на лабораторной установке: а) церковь Жен-Мироносиц б) Спасопреображенский собор в) Рождественская церковь г) Крестовоздвиженский собор

В исследованной литературе [2,96] наиболее оптимальным вариантом расположения приточных и вытяжных отверстий в православных храмах выделяется нижний ярус оконных проемов и оконные проемы в барабанах соответственно. Однако такой подход для церкви Жен-Мироносиц не годится, ввиду отсутствия во всех пяти барабанах отверстий. Таким образом, в качестве вытяжных отверстий в рассматриваемом православном храме можно принять верхние ярусы окон.

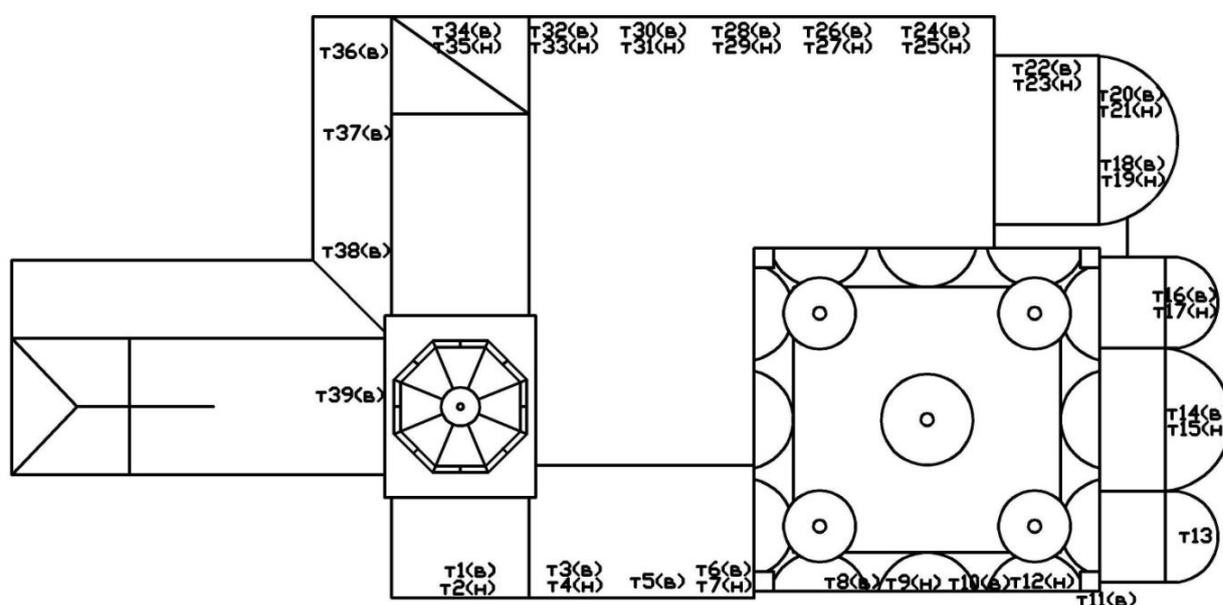


Рис. 3.7. Расположение характерных точек на плане церкви Жен-Мироносиц (Нижний Новгород, ул. Добролюбова, год постройки: 1649)

В церкви Жен-Мироносиц было выполнено 39 характерных точек исследования:

Северная сторона: 14 точек, из которых 7 - приточные отверстия, расположенные в первом (нижнем) ярусе окон храма и 7 – вытяжные отверстия, находящиеся во втором (верхнем) ярусе окон храма.

Южная сторона: 12 точек, из которых 5 – приточные отверстия, расположенные в первом (нижнем) ярусе храма и 7 точек, выполняющие роль вытяжных отверстий, 4 из которых расположены во втором ярусе (верхнем в своей области), а 3 в третьем ярусе (верхнем).

Восточная сторона (алтарная часть): 9 точек, из которых 4 отверстия выполняют роль приточных отверстий, расположенных в первом ярусе окон храма, и 5 – приточных отверстий, расположенных во втором ярусе окон храма.

Западная сторона: 4 точки, выполняющие роль вытяжных отверстий.



Рис. 3.8. Модель церкви Жен-Мироносиц на лабораторной установке

В Крестовоздвиженском храме стоит отметить наличие куполов не соединенных с молельным залом (фальшкупола), что делает невозможным осуществление через них воздухообмена. Только центральный барабан соединен с молельным залом.

Таким образом, в Крестовоздвиженском храме было выполнено 24 характерных точки исследования из которых: 16 приточных отверстий, расположенных в нижней части православного храма (2 на западе, 6 на юге, 6 на востоке, 2 на севере); 8 являются вытяжными отверстиями, расположенными в верхней части каждого оконного проема центрального барабана.

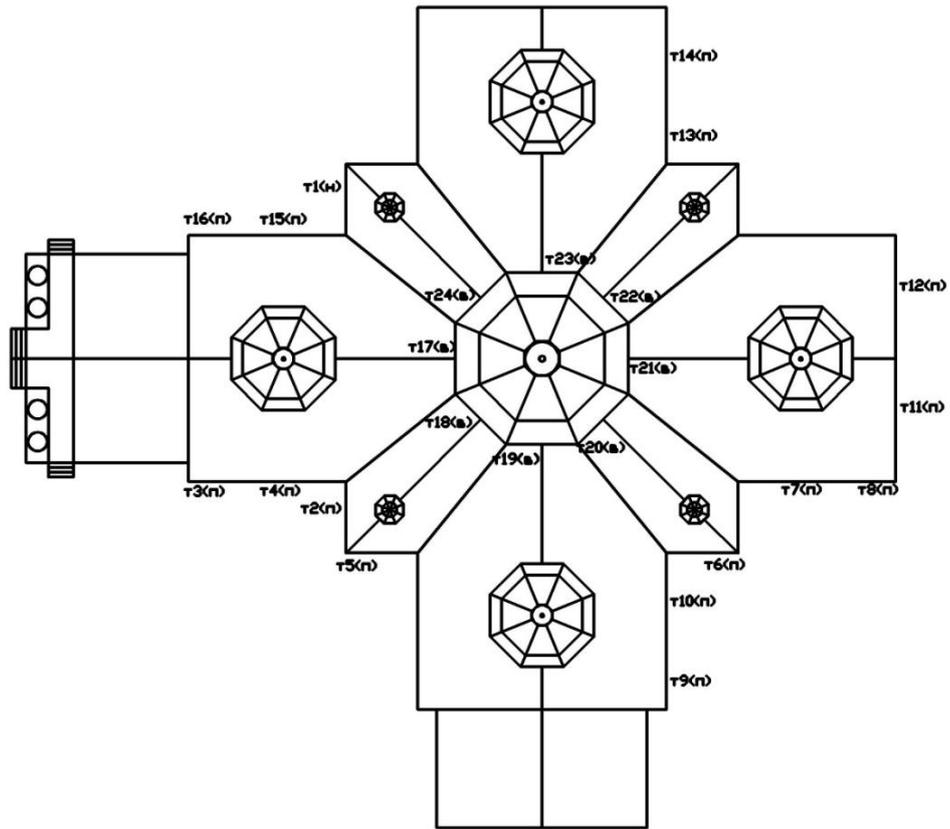


Рис. 3.9. Расположение характерных точек на плане Крестовоздвиженского собора (Нижний Новгород, пл. Лядова, год постройки: 1823)



Рис. 3.10. Модель Крестовоздвиженского собора на лабораторной установке

В Рождественской церкви, при исследовании внешней аэродинамики нельзя не учесть особенности рельефа, а также колокольню, соединенную с храмом одним ярусом. Отверстия выполняются только в основной части храма. Стоит отметить, что в Рождественской церкви все барабаны соединены с молельным залом, и окна в барабане над алтарем так же могут играть роль вытяжных отверстий. Однако в отличие от Крестовоздвиженского храма, барабаны Рождественской церкви близко расположены друг к другу, что существенно ограничивает количество оконных проемов, которые можно эффективно использовать в качестве вытяжных отверстий. С другой стороны, так как все барабаны соединены с молельным залом, то количество оконных проемов для размещения вытяжных отверстий значительно превышает их количество в Крестовоздвиженском храме, что позволяет рассмотреть различные варианты по размещению вытяжных отверстий.

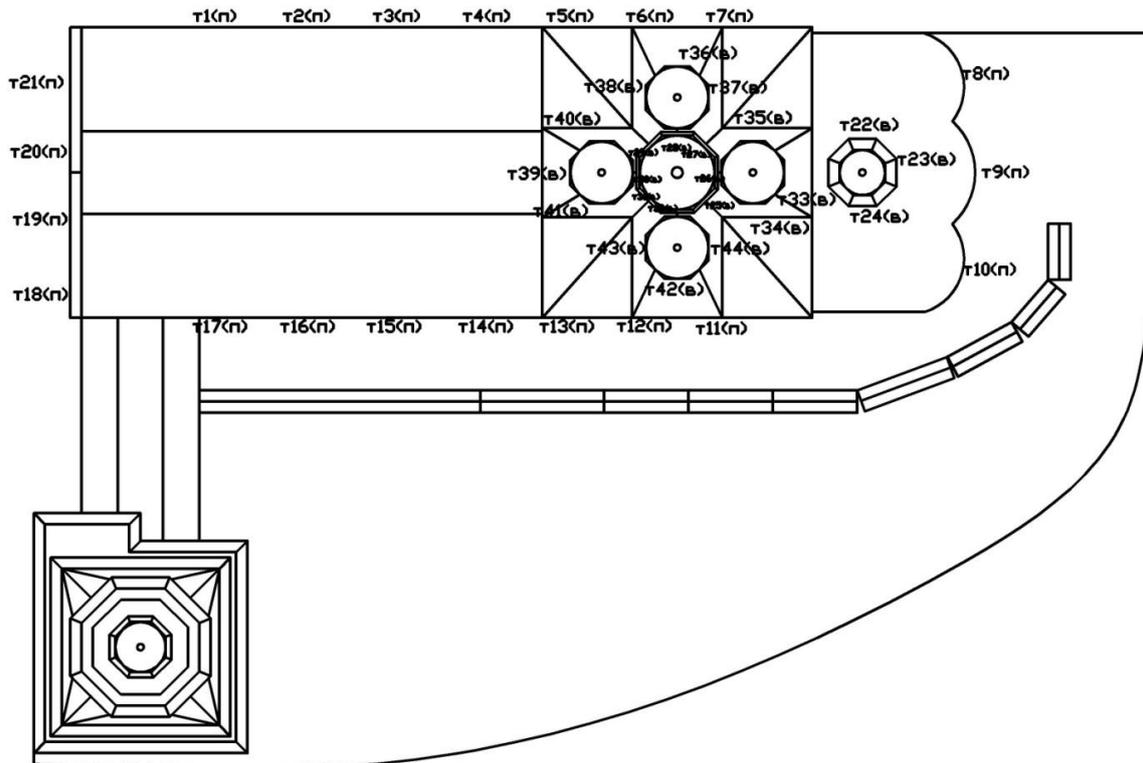


Рис. 3.11. Расположение характерных точек на плане Рождественской церкви (Нижний Новгород, ул. Рождественская, год постройки: 1653)

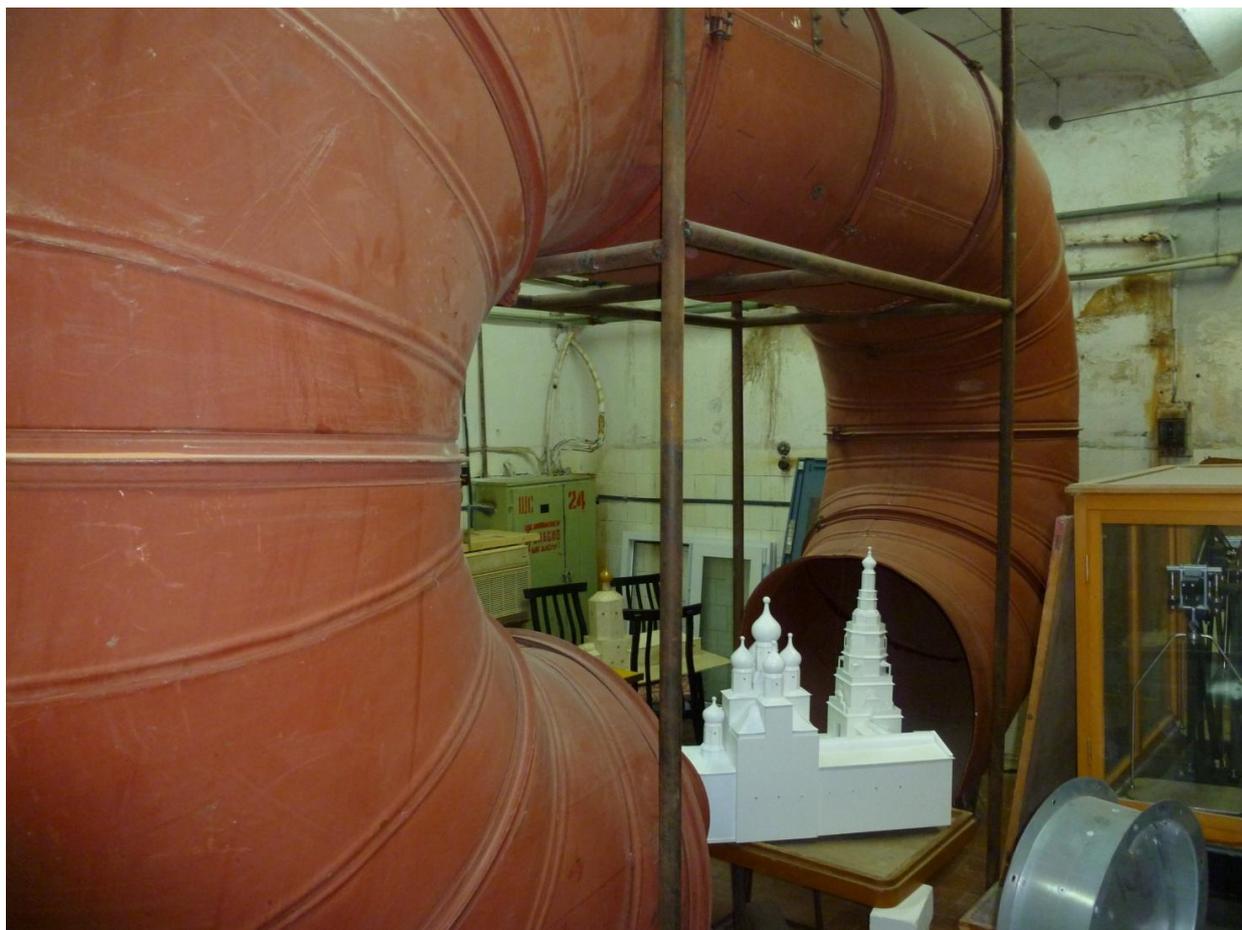


Рис. 3.12. Модель Рождественской церкви на лабораторной установке

В Рождественской церкви было выполнено 44 характерных точки исследования, из которых: 21 приточное отверстие, которые расположены в нижней части православного храма (7 на севере, 3 на востоке, 7 на юге, 4 на западе); 23 вытяжных отверстия, 3 из которых расположены в барабане над алтарем, в восточном, северном и южном оконных проемах, по 3 отверстия в оконных проемах вспомогательных барабанов и 8 отверстий в каждом оконном проеме основного барабана.

В Спасопреображенском соборе форма барабанов отличается от Крестовоздвиженского собора и Рождественской церкви, в основании которых не восьмерик, а шестнадцатиугольник. В боковых барабанах для вытяжных отверстий доступно 9 оконных проемов, причем стоит отметить, что в этом храме оконные проемы практически не перекрываются другими барабанами или иными конструкциями (исключением является западный барабан, перекрываемый колокольней).

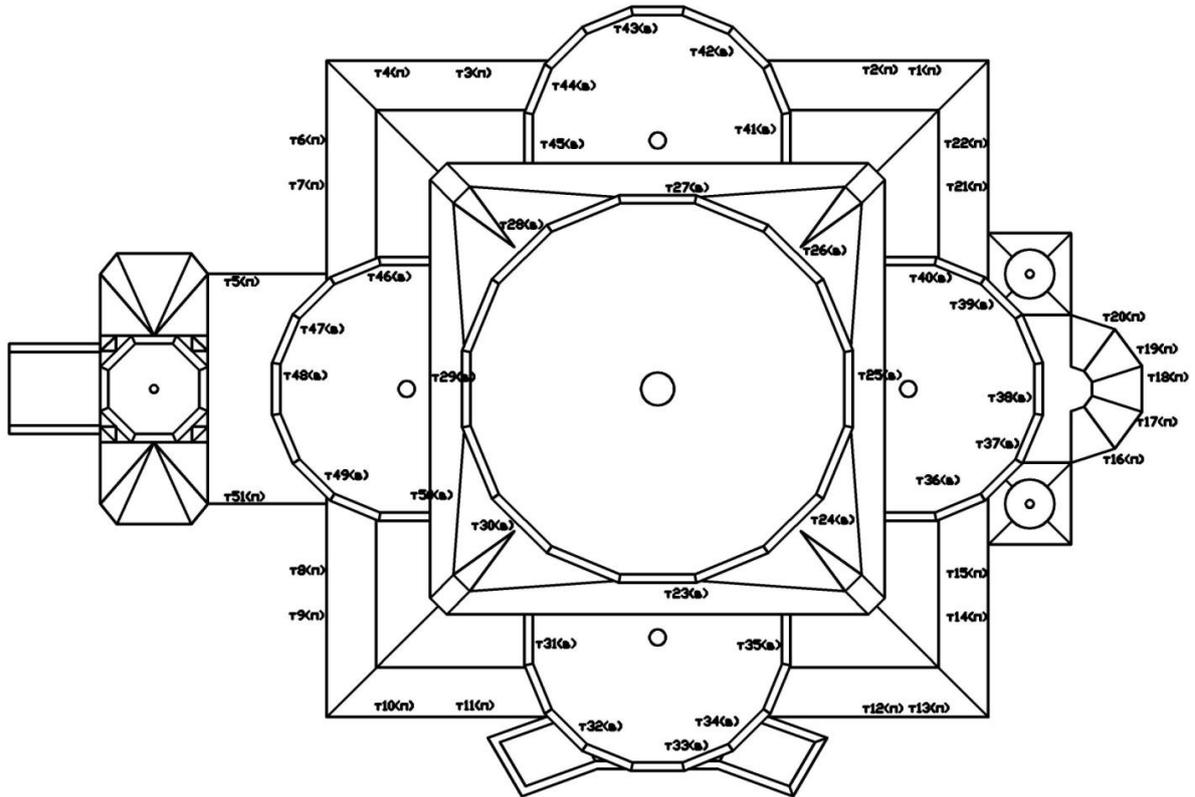


Рис. 3.13. Расположение характерных точек на плане Спасопреображенского собора (Нижний Новгород, Сормово, год постройки: 1903)



Рис. 3.14. Модель Спасопреображенского собора на лабораторной установке

В Спасопреображенском храме была выполнена 51 характерная точка исследования, из которых: 22 приточных отверстия, выполненных в нижнем ярусе окон православного храма (5 – юг, 4 – запад, 5 – север, 9 - восток); 29 вытяжных отверстий, по 5 отверстий в каждом из боковых барабанов и 9 отверстий в основном барабане.

Результаты проводимых исследований приводятся в приложениях Б (Значения аэродинамических коэффициентов).

### **3.5. Исследование полей температуры и скорости в помещениях православных храмов**

Стоит отметить, что всего существует четыре варианта расположения оконных проемов и отопительных приборов на наружной стене (рис.3.15).

В характерных точках, в храме «Вознесения господня» в Нижнем Новгороде (ул. Ильинская, год постройки: 1621) были проведены замеры температурных полей внутренних поверхностей наружной стены с помощью инфракрасного термометра Raytek Raynger ST20. В начальных точках были измерены температурные и скоростные поля воздуха с помощью термоанемометра ТТМ-2/1-06-2А. (Приложение А)

Термоанемометр состоит из блока измерения и подключаемого к нему измерительного преобразователя, соединенного с блоком измерения удлинительным кабелем. Измерительный преобразователь выполняется в металлическом корпусе и состоит из металлической трубки с наконечником. В нем располагаются сенсоры и корпуса, в которых находится схема предварительной обработки сигналов. В качестве чувствительных элементов для измерения температуры и скорости потока воздуха применены миниатюрные платиновые терморезисторы. Принцип работы термоанемометра основан на измерении охлаждения воздушным потоком нагретого платинового терморезистора. Измерительный блок считывает информацию в виде температуры и скорости воздушного пото-

ка из измерительного преобразователя и отображает их на индикаторах лицевой панели.

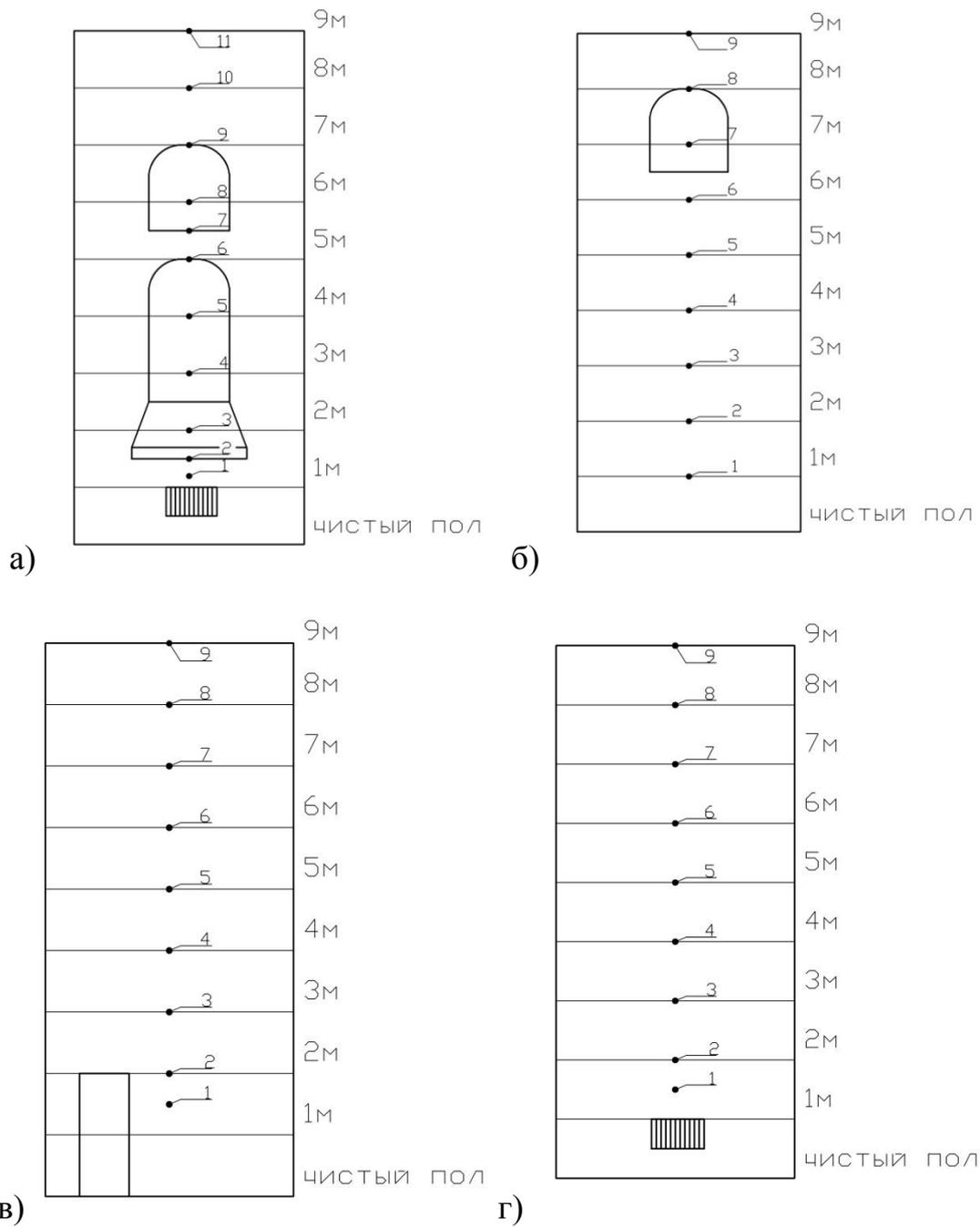


Рис. 3.15 Варианты расположения оконных проемов и приборов на наружной стене: а) отопительный прибор и окно б) только окно в) без окон г) только отопительный прибор.

У стены без окон температура воздуха достигала  $18,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость приняла значения от  $0,05\text{-}0,2\text{ м/с}$ . Над отопительным прибором (рядом с окном) температура воздуха составила  $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а скорость воздуха – от  $0,14\text{-}0,32\text{ м/с}$ . В случае с отдельно стоящим отопительным прибором температура воздуха составила  $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а скорость достигла  $0,37\text{ м/с}$ .

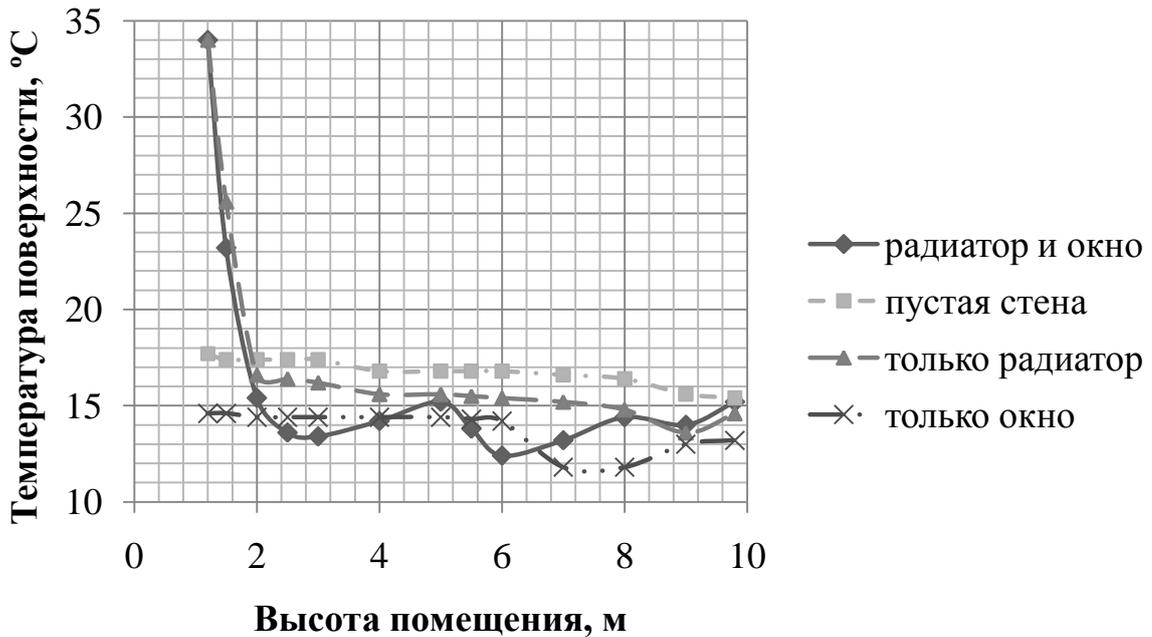


Рис. 3.16. Зависимость температуры поверхности наружной стены в православном храме от высоты при различных вариантах расположения окон и отопительных приборов.

Результаты исследования температурных полей внутренней поверхности представлены в графической форме на рис. 3.16. Из графика (рис. 3.16) видно, что области самых низких температур приходятся на оконные проемы. На небольшом расстоянии от отопительного прибора (0,5 м) происходит резкое падение температуры до значений, как в случае со стеной без окон или даже ниже.

### 3.7. Определение расхода свечей

Использовать свечи во время молитвы – это очень древняя традиция (Исх. 25,31-37), символ добровольной жертвы Богу, свидетельства веры, причастности человека к божественному свету. Горение свечи сопровождает православного человека на протяжении всего его жизненного пути: во время крещения, венчания и погребения. Также прихожане зажигают свечи во время посещения храма, служб, таинств и престольных праздников.

С позиции микроклимата в храме свечи выделяют большое количество теплоты, сопоставимое с мощностью систем отопления. В то же время процесс

горения свечей сопровождается выделением угарного газа, влаги и сажи, последняя из которых оседает на стенах храма, иконах и фресках, в том числе над отопительными приборами, независимо от климатических условий. Однако в современных нормативных источниках, такая важная величина, как расход свечей и его определение в храмах не рассматривается [3], хотя без знания данной величины невозможно точно определить количество приточного и удаляемого воздуха из храма.

Православные храмы являются уникальными сооружениями, поэтому замеры расхода свечей для расчета определялись индивидуально для каждого сооружения.

Количество свечей, постоянно горящих в храме, ограничивается количеством подсвечников, однако во время проведения некоторых престольных праздников прихожане держат горящие свечи в руках.

Наибольшая посещаемость храма прихожанами отмечается в Пасху или Светлое Христово Воскресение (важнейший христианский праздник и главное богослужбное событие церковного календаря) и двенадцатые праздники (двенадцать важнейших праздников после Пасхи, среди которых: Рождество Христово, Крещение Господне, Благовещение Пресвятой Богородицы, Успение Богородицы и др.).

Согласно проведенным нами статистическим исследованиям наиболее часто в православных храмах используются столешницы, состоящие из 3, 9, 12, 18, 24, 26, 36, 40, 48, 50, 52, 100 гнезд под свечи.

В большинстве случаев прихожане приобретают свечи более низкой ценовой категории (вес таких свечей составляет от 3 до 10 г.).

В рамках молодежного проекта Stem-центры нам удалось провести соответствующие замеры расходов свечей в семи православных храмах Нижнего Новгорода в различные периоды года.

В храме Архангела Михаила (на территории Нижегородского кремля) расположено 170 гнезд под свечи в подсвечниках и в среднем расход свечей составляет 0,78 кг/ч.

В церкви Жен-Мироносиц (ул. Добролюбова) расположено 448 гнезд под свечи, средний расход – 2,15 кг/ч.

В церкви Успения Божией Матери (пер. Крутой) 438 гнезд под свечи, средний расход – 1,58 кг/ч.

В церкви Преподобного Сергия Радонежского (ул. Сергиевская) 496 гнезд под свечи, средний расход – 2,38 кг.

В церкви Вознесения Господня (ул. Ильинская) количество гнезд под свечи 313 гнезд, средний расход 1,44 кг.

В церкви Всемиловейшего Спаса (ул. Максима Горького) количество гнезд 735, средний расход 3,38 кг.

В Крестовоздвиженском соборе (ул. Окский Съезд) количество гнезд 526, средний расход 2,21 кг.

Несмотря на относительное внешнее сходство некоторых храмов и значительно отличающееся количество гнезд под свечи, как в церквях Жен-Мироносиц и Успения Божьей Матери, средний расход свечей может быть различным (в первом храме на 26% больше). Оба эти храма относятся к типу «Корабль», имеют замоналиченный свод молельного зала, и, как следствие, через барабаны данного храма невозможно осуществлять естественную вентиляцию. Однако церковь Жен-Мироносиц представляет собой объединенную летнюю и зимнюю церкви, вследствие чего молельный зал в плане имеет Г-образную форму без перегородок, в то время как в церкви Успения Божией Матери – Т-образную.

Стоит отметить неравномерный расход свечей в пределах молельного зала каждого православного храма (рис.7), но для инженерной методики достаточно использовать полученное нами усредненное значение этой величины, которое отличалось в зависимости от периода года. Для учета архитектурных и конструктивных особенностей храма нами была введена эмпирическая величина – коэффициент формы (табл. 1).

Таблица 3.1

**Значение коэффициента формы для исследованных храмов**

Название храма	$K_{\phi}$
храм Архангела Михаила	0,96
церковь Жен Мироносиц	1,00
церковь Успения Божией Матери	0,75
церковь Преподобного Сергия Радонежского	1,00
церковь Вознесения Господня	0,96
храм Всемиловейшего Спаса	0,96
Крестовоздвиженский собор	0,88
замкнутое пространство (отсутствие оконных проемов)	1,13

При 50% наполняемости прихожанами молеельного зала православного храма, по статистике [1] наблюдается полная наполняемость свечами гнезд в подсвечниках. При максимальной наполняемости прихожанами молеельного зала (во время главных престольных праздников) помимо свечей в подсвечниках прихожане сжигают свечи в руках, но, как правило, их число не превышает 30%. На основании проведенных нами экспериментальных исследований были сформулированы следующие математические зависимости, записанные в общем виде:

$$G_{\text{свечей}}^{\text{мин.}} = \frac{0,1 \cdot g_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.21)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{ср.}} = \frac{g_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.22)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{макс.}} = \frac{g_{\text{св}} (n_{\text{св}} + 0,3n_{\text{пр}}) \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.23)$$

где  $G_{\text{свечей}}^{\text{мин.}}$ ,  $G_{\text{свечей}}^{\text{ср.}}$ ,  $G_{\text{свечей}}^{\text{макс.}}$  – расход свечей кг/ч соответственно для минимальной (10%), средней (50%) и максимальной (100%) наполняемости молеельного зала прихожанами;  $n_{\text{св}}$  – общее количество гнезд под свечи в храме, шт.;  $n_{\text{пр}}$  – максимальное количество прихожан, чел.;  $K_{\phi}$  – коэффициент формы;  $g_{\text{св}}$  –

величина расхода свечей с одного гнезда г/ч.

С учетом использования полученных усредненных значений расхода свечей с одного гнезда в различные периоды года мы получаем следующие зависимости:

для зимы:

$$G_{\text{свечей}}^{\text{мин.з.}} = \frac{0,3 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.24)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{ср.з.}} = \frac{4,2 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.25)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{макс.з.}} = \frac{4,2(n_{\text{св}} + 0,3n_{\text{пр}}) \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.26)$$

для лета:

$$G_{\text{свечей}}^{\text{мин.л.}} = \frac{0,48 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.27)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{ср.л.}} = \frac{4,8 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.28)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{макс.л.}} = \frac{4,8(n_{\text{св}} + 0,3n_{\text{пр}}) \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.29)$$

для переходного периода:

$$G_{\text{свечей}}^{\text{мин.пер.}} = \frac{4,9 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.30)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{ср.пер.}} = \frac{5,0 \cdot n_{\text{св}} \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.31)$$

$$G_{\text{свечей}}^{\text{макс.пер.}} = \frac{5,0(n_{\text{св}} + 0,3n_{\text{пр}}) \cdot K_{\phi}}{1000} \quad (3.32)$$

### 3.8. Оценка точности измерений

Каждое измеряемое значение некоторой величины в общем случае есть приближённое значение этой величины. Погрешность измерения определяется разрешающей точностью прибора, которым измеряют данную величину. Абсолютная погрешность  $\Delta$  измерительных приборов определяется по их классу точности.

При производстве опытов по нахождению аэродинамических коэффициентов использовались:

Секундомер -  $\Delta \tau = 0,5$  с;

Анемометр чашечный -  $\Delta n = 1$  об / с;

Микроманометр ММН-240 -  $\Delta h = 0,5$  мм.

При выполнении опытов по нахождению температурных и скоростных полей около внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций использовался термоанемометр ТТМ-2/1-06-2А. Термоанемометр проходил ежегодную проверку и тарировку на приборостроительном заводе «Эталон» г. Н. Новгорода.

При измерении температур щупами в интервале 5...15 °С погрешность измерений составляет  $\Delta t = \pm 0,1$  °С, а относительная погрешность в режимном интервале температур -1...+4 °С равна  $\delta t = \pm 2,5$  %.

Погрешность равна половине величины наименьшей цены деления прибора. Шкала прибора ТТМ-2/1-06-2А, которым проводились замеры, отградуирована по 0,01 mV. При измерении значения показаний прибора на  $\Delta Z = 0,01$  mV температура изменяется на  $\Delta t = 0,175$  °С, что соответствует погрешности  $\Delta t = \pm 0,0875$  °С. Погрешность при измерении скорости  $\Delta v = 0,1$  м / с.

Абсолютная ошибка результатов косвенного измерения величины  $y = f(x_1, x_2, x_3)$  – определяется как среднее квадратичное отклонение:

$$\Delta y = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \Delta x_1^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \Delta x_2^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_3} \right)^2 \Delta x_3^2,$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  вычисляется для средних значений параметров  $x_i$ ;

$\Delta x_i$  – абсолютная погрешность измерения величины  $x_i$ .

### **Выводы по третьей главе**

1. При проектировании систем естественной вентиляции в православных храмах следует учитывать наличие или отсутствие перегородок между модельным залом и барабаном. Приточные фрамуги размещаются в нижнем ярусе окон, вытяжные в оконных проемах барабанов, если свод открытый в верхней части полусферы, и в верхнем ярусе оконных проемов - если полностью замкнутый свод.

2. Полученные аэродинамические коэффициенты могут быть использованы для расчета систем естественной вентиляции, как исследованных храмов, так и схожих с ними по размеру и стилю. Для этого необходимо на планах исследованных храмов отложить в масштабе значения аэродинамических коэффициентов (положительные значения откладываются внутрь - отрицательные наружу). Если соединить значения приточных аэродинамических коэффициентов для приточных и вытяжных фрамуг линией, то можно получить динамическую характеристику распределения ветряных потоков. Динамическая характеристика переносится на схожий храм и, в зависимости от расположения оконных проемов, определяются аэродинамические коэффициенты для наветренной и заветренной сторон.

3. Расчет площадей приточных и вытяжных фрамуг выполняется для преобладающих ветров, для летнего и зимнего периодов. Поскольку храмы были испытаны по восьми направлениям, результаты могут быть использованы для любых климатических зон.

4. Наибольшие отрицательные значения аэродинамических коэффициентов отмечаются у церкви Жен-Мироносиц при восточном направлении ветра в алтарной части (-2,05). Схожие значения аэродинамических коэффици-

ентов (-1,95) отмечаются у алтарной части Рождественской церкви при восточном направлении ветра.

5. Для Церкви Жен-Мироносиц при испытаниях С, Ю, значения аэродинамических коэффициентов с наветренной стороны составляют в среднем 0,8-1,0 с подветренной 0,1-0,2; для Рождественской церкви со стороны заграждения (южная сторона) такие значения будут ниже (для отверстий нижнего яруса) 0,6-0,8 и 0,1-0,15 соответственно.

6. При СЗ, СВ, ЮВ, ЮЗ испытаниях Крестовоздвиженского храма значения аэродинамических коэффициентов в центральном барабане составляют +0,41 с наветренной стороны, во всех остальных точках значения варьируются от (-0,18)-(-0,33)

7. Немаловажную роль при проектировании естественной вентиляции играет внутренняя аэродинамика. Поскольку в храмах происходят богослужения, горят свечи, меняется количество прихожан, работают системы отопления, все факторы оказывают влияние на микроклимат православных храмов. К тому же требуется сохранить иконы и фрески. В результате исследований разработана инженерная методика, учитывающая мощность систем отопления, количество прихожан и тепловыделения от них, тепловыделения от свечей и другие факторы.

## Глава 4. Инженерная методика расчетов систем аэрации в православных храмах

При расчете площадей приточных и вытяжных фрамуг в системах аэрации следует учитывать влияние, как внешних факторов – давление ветра, так и внутренних факторов – тепловыделения от людей, свечей и отопительных приборов.

Существует несколько методик по расчету систем аэрации в промышленных зданиях, однако методика, учитывающая особенности православных храмов отсутствует.

В настоящее время, благодаря различным исследованиям [2,88,89,90,91,92,93, 94, 95,96] стали известны многие справочные данные, необходимые для расчета систем естественной вентиляции.

### 4.1. Исходные данные для расчета

Из Стандарта [2], для исходных данных потребуются описанные ниже справочные данные.

Выделение теплоты, влаги и  $\text{CO}_2$  от свечей:

- тепловыделения от свечей по низшей теплоте сгорания парафина  $Q_{\text{нр}} = 46810$  кДж/кг;
- влаговыделения от свечей  $G_w = 1,3$  кг/кг парафина;
- количество  $\text{CO}_2$ , выделяемого при сгорании 1 кг свечей,  $C_{\text{CO}_2, \text{св}} = 1650$  л/кг;

Как уже было описано ранее, количество свечей следует определять по зависимостям (3.24-3.32). При этом важно учесть архитектурный стиль и форму православного храма, воспользовавшись коэффициентом формы из таблицы 3.1. Допустимые параметры внутреннего воздуха обслуживаемой зоны основных помещений храма и Выделение тепла, влаги и  $\text{CO}_2$  одним человеком выбираются соответственно по таблицам 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

Допустимые параметры внутреннего воздуха обслуживаемой зоны основных помещений храма

Период года	Помещение	Допустимые параметры внутреннего воздуха		
		температура $t_{в}$ , °C	влажность $\phi_{в}$ , %	подвижность, $\nu_{в}$ , м/с
Холодный и переходный	Центральная часть храма	12-16*	30-55	0,2
	Алтарь	14-18*	30-55	0,1
	Ризница, диаконский придел	14-18*	30-55	0,2
	Крещальня	22-25*	30-60	0,15
Теплый	Все помещения	28**	75	0,3

Таблица 4.2

Выделение тепла, влаги и CO<sub>2</sub> одним человеком

Выделение CO <sub>2</sub> , л/ч	Температура воздуха обслуживаемой зоны помещения																	
	10 °C			15 °C			20 °C			25 °C			30 °C			35 °C		
	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч	$Q_{явн}$ , Вт	$Q_{пл}$ , Вт	$Q_{w}$ , г/ч
3	40	65	0	20	45	0	0	20	0	0	5	0	0	5	5	0	5	15

### Примечания

1.  $Q_{явн}$ ,  $Q_{пл}$  - соответственно явная и полная теплота, Вт;  $G_w$  - влаговыделение, г/ч.

2. Приведены средние данные для мужчин; для женщин вводится поправочный коэффициент 0,85 для детей 0,75.

3. Для соответствующих расчетных условий при учете влияния одежды на величину отдачи человеком явного тепла табличное значение  $Q_{явн}$  следует умножить на поправочный коэффициент, равный: 1 - для легкой одежды, 0,65 - для обычной (средней утепленности) одежды, 0,48 - для утепленной одежды.

Допустимая концентрация  $\text{CO}_2$

- в удаляемом воздухе  $2,0 \text{ л/м}^3$ ;
- в наружном (приточном) воздухе  $0,33 \text{ л/м}^3$  - для села;  $0,4 \text{ л/м}^3$  - для малого города;  $0,5 \text{ л/м}^3$  - для большого города.

Расчетные значения разности температур внутреннего и приточного воздуха для определения температуры приточного воздуха  $t_{\text{пр}}$

- при подаче воздуха в зону обслуживания принимать  $t_{\text{в}} - t_{\text{пр}} \leq 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- при подаче воздуха в зону выше зоны обслуживания принимать:
  - $t_{\text{в}} - t_{\text{пр}} \leq 4 \text{ }^\circ\text{C}$  на высоте  $2,5-3,5 \text{ м}$  от пола;
  - $t_{\text{в}} - t_{\text{пр}} \leq (5-8) \text{ }^\circ\text{C}$  на высоте  $4,0-7,0 \text{ м}$  от пола;
  - $t_{\text{в}} - t_{\text{пр}} \leq 10-12 \text{ }^\circ\text{C}$  на высоте  $h > 7,0 \text{ м}$  от пола.

Расчетные значения температурного градиента по высоте помещения для определения температуры удаляемого воздуха  $t_{\text{уд}}$

В крестово-купольных и шатровых храмах температурный градиент выше обслуживаемой зоны нахождения людей до уровня вытяжных отверстий рекомендуется принимать:

- для естественной системы вентиляции  $\Delta t = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/м}$ ;
- для системы воздушного отопления, совмещенного с вентиляцией,  $\Delta t = 0,1 \text{ }^\circ\text{C/м}$ ;
- при удалении воздуха из зоны обслуживания (от  $0,3$  до  $2,0 \text{ м}$  от пола) принимать  $t_{\text{уд}} = t_{\text{в}}$ .

Помимо справочных данных, для расчета систем аэрации каждого православного храма должны быть известны следующие величины:

1. Объем молельного зала и другие геометрические параметры храма.
2. Мощность систем отопления.
3. Количество прихожан (минимальное, среднее количество, максимальное).
4. Количество свечей (в зависимости от количества прихожан).
5. Преобладающее направление и скорость ветра для расчетного периода года.

6. Расположение оконных проемов для систем аэрации и возможность монтажа вытяжных фрамуг в окнах барабанов храма.

Условно методику по расчету систем аэрации можно разделить на 2 этапа:

- Определение выделяющейся теплоты от отопительных приборов, людей, свечей и лампад, т.е. теплоту удаляемую системами аэрации.
- На основании расчета количества теплоты, удаляемого аэрацией определить площади приточных и вытяжных фрамуг.

С учетом меняющегося количества прихожан и климатических особенностей Российской Федерации, результаты данного расчета в общем виде могут быть сведены в следующую таблицу:

Таблица 4.3

Значения площадей приточных и вытяжных фрамуг в зависимости от периода года и количества прихожан

Период	Минимальное количество прихожан – 10%		Среднее количество прихожан – 50%		Максимальное количество прихожан – 100%	
	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{ух}}$	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{ух}}$	$F_{\text{пр}}$	$F_{\text{ух}}$
Летний	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{л}}$	$F_{\text{ух.мин}}^{\text{л}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{л}}$	$F_{\text{ух.ср}}^{\text{л}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{л}}$	$F_{\text{ух.макс}}^{\text{л}}$
Переходный	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{п}}$	$F_{\text{ух.мин}}^{\text{п}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{п}}$	$F_{\text{ух.ср}}^{\text{п}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{п}}$	$F_{\text{ух.макс}}^{\text{п}}$
Зимний	$F_{\text{пр.мин}}^{\text{з}}$	$F_{\text{ух.мин}}^{\text{з}}$	$F_{\text{пр.ср}}^{\text{з}}$	$F_{\text{ух.ср}}^{\text{з}}$	$F_{\text{пр.макс}}^{\text{з}}$	$F_{\text{ух.макс}}^{\text{з}}$

где  $F_{\text{пр}}$  – общая площадь приточных фрамуг,  $F_{\text{ух}}$  – общая площадь вытяжных фрамуг

## 4.2. Определение выделяющейся теплоты, необходимой для удаления системами аэрации

Для удобства дальнейшего использования получившихся данных по теплотерям и теплоизбыткам тепловой баланс отапливаемого храма сводим в таблицу.

Таблица 4.4

Тепловой баланс отапливаемого храма

Период года	Теплопотери $Q_{\text{пот}}, \text{Вт}$	Численность, чел	Тепловыделения, Вт				$\Delta Q, \text{Вт}$
			Люди $Q_{\text{л}}, \text{Вт}$	Свечи $Q_{\text{св}}, \text{Вт}$	Отопление $Q_{\text{от}}, \text{Вт}$	$\Sigma Q,$ Вт	
Холодный	1	2	3	4	5	6	7
Переходный							
Теплый							

Тепловой баланс составляется для трех расчетных периодов года: холодного, переходного и теплого периодов.

1. Теплопотери через ограждающие конструкции храма определяются исходя из теплотехнического расчета ограждающих конструкций зданий по методике [2]
2. Для каждого периода года рассчитывается: минимальное количество прихожан – 10%, среднее – 50% и максимальное – 100% от общей вместимости в храм.
3. Считаем, что 50% прихожан составляют женщины, 30% мужчины и 20% дети. Явное количество теплоты, выделяемое одним взрослым человеком, определяется по зависимости [97]:

$$q_m = \beta_u \cdot \beta_{od} \cdot (2,5 + 10,36 \cdot \sqrt{v}) \cdot (35 - t_g) \quad (4.1)$$

где  $\beta_u$  - коэффициент, учитывающий интенсивность работы, принимается равным 1.

$\beta_{od}$  - коэффициент, учитывающий теплозащитные свойства одежды, в зависимости от периода года согласно 4.1.

$\nu$  - подвижность воздуха в помещении, принимается 0,1 м/с

Тепловыделения женщин составляют 85% от мужчин

Тепловыделения от детей – 75% тепловыделений от мужчин

Таким образом, общие тепловыделения от людей будут составлять:

$$Q_{л} = n \cdot q_{м} \cdot 0,3 + n \cdot q_{м} \cdot 0,5 \cdot 0,85 + n \cdot q_{м} \cdot 0,2 \cdot 0,75 \quad (4.2)$$

где  $n$  – количество прихожан

Подставим 4.1 в 4.2 и получим

$$Q_{л} = n \cdot 0,875 \cdot \beta_{u} \cdot \beta_{od} \cdot (2,5 + 10,36 \cdot \sqrt{\nu}) \cdot (35 - t_{e}) \quad (4.3)$$

4. Количество свечей подсчитывается для каждого периода года и количества прихожан с помощью справочных данных, приведенных в таблице 4.2. промежуточные значения определяются интерполяцией. Количество теплоты, выделяемое от свечей определим по формуле:

$$Q_{св} = Q_{p}^H \cdot G_{св} \quad (4.4)$$

5. Общая мощность системы отопления для холодного периода года, компенсирующая теплопотери (1 пункт)
6. Определим суммарные тепловыделения:

$$\Sigma Q = Q_{л} + Q_{св} + Q_{от} \quad (4.5)$$

7. Определим величину теплоизбытков, удаляемых аэрацией для каждого периода года:

$$\Delta Q = \Delta Q_{aэp} = \Sigma Q - Q_{ном} \quad (4.6)$$

### 4.3. Расчет аэрации с учетом теплопотерь

Аэрация для православных храмов будет рассчитываться таким же образом, как и для промышленных зданий (с некоторыми исключениями), с совме-

ственным действием теплоизбытков и ветровых нагрузок, поскольку влияние тепловыделений от людей, свечей и отопительных приборов будет существенным.

1) Определяется массовый расход удаляемого аэрацией воздуха:

$$G_{\text{аэп.ух.}} = \frac{3,6 \cdot \Delta Q_{\text{аэп}}}{c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{yx}} - t_{\text{н}})} \quad (4.7)$$

2) Определяется внутреннее давление в помещении на уровне каждой из фрамуг:

$$\begin{aligned} P_{\text{вн1}} &= P_{\text{во}} + H_1 \cdot (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{п.з.}}); \\ P_{\text{вн2}} &= P_{\text{во}} + H_2 \cdot (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{yx}}); \\ P_{\text{вн3}} &= P_{\text{во}} + H_1 \cdot (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{п.з.}}); \\ P_{\text{вн4}} &= P_{\text{во}} + H_2 \cdot (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{yx}}). \end{aligned} \quad (4.8)$$

3) Определяем среднее динамическое давление ветра с наветренной стороны здания:

$$P_{\text{д.в}} = \frac{v_{\text{в}}^2}{2} \rho_{\text{н}} \quad (4.9)$$

4) Определяется давление ветра на уровне каждой из фрамуг:

$$\begin{aligned} P_{\text{v1}} &= \pm C_{\text{v1}} \cdot P_{\text{д.в}}; \\ P_{\text{v2}} &= \pm C_{\text{v2}} \cdot P_{\text{д.в}}; \\ P_{\text{v3}} &= \pm C_{\text{v3}} \cdot P_{\text{д.в}}; \\ P_{\text{v4}} &= \pm C_{\text{v4}} \cdot P_{\text{д.в}}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

5) Определяем избыточное давление на уровне каждой из фрамуг по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{изб1}} &= P_{\text{в1}} - P_{\text{v1}}; \\ \Delta P_{\text{изб2}} &= P_{\text{в2}} - P_{\text{v2}}; \\ \Delta P_{\text{изб3}} &= P_{\text{в3}} - P_{\text{v3}}; \\ \Delta P_{\text{изб4}} &= P_{\text{в4}} - P_{\text{v4}}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

По знаку избыточного давления определим назначение фрамуги: «+» - приточная, «-» - вытяжная.

б) Из условия полного расходования энергии на преодоление сопротивления во фрамугах определяются скорости:

$$\begin{cases} \text{приточные} \\ v_1 = \sqrt{\frac{2|\Delta P_{изб1}|}{\rho_n}}; \\ v_2 = \sqrt{\frac{2|\Delta P_{изб2}|}{\rho_n}}; \\ \text{вытяжные} \\ v_3 = \sqrt{\frac{2|\Delta P_{изб3}|}{\rho_v}}; \\ v_4 = \sqrt{\frac{2|\Delta P_{изб4}|}{\rho_v}}. \end{cases} \quad (4.12)$$

7) Уравнение массового баланса воздуха:

$$G_{np1} + G_{np2} = G_{yx3} + G_{yx4} + G_{м.о.}$$

Однако значение расхода воздуха от местных отсосов  $G_{м.о.}$  для православных храмов будет равно 0

в развернутом виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{np1} \cdot v_1 \cdot \mu_{np} \cdot \rho_n \cdot 3600 + F_{np2} \cdot v_2 \cdot \mu_{np} \cdot \rho_n \cdot 3600 = F_{yx3} \cdot v_3 \cdot \mu_{yx} \cdot \rho_v \cdot 3600 + \\ + F_{yx4} \cdot v_4 \cdot \mu_{yx} \cdot \rho_v \cdot 3600 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Из этого уравнения площади приточных и вытяжных фрамуг определяются методом последовательных приближений:

$$\text{Приравниваются } F_{np1} = F_{np2} = F_{np}, F_{yx3} = F_{yx4} = F_{yx};$$

пограничного слоя содержит условия  $F_{np}$  (или  $F_{yx}$ ) и определяют  $F_{yx}$  (или  $F_{np}$  соответственно)

Далее проверяют полученный результат с имеющейся в православном храме площадью открывающихся соответствующих фрамуг.

### **Выводы по четвертой главе.**

1. При подсчете теплового баланса для православных храмов следует обязательно учитывать влияние тепловыделений от людей и свечей, поскольку их значение сравнимо, или в некоторых случаях превосходит тепловыделения от систем отопления. Тепловыделения от людей при минимальном заполнении храма составляют 5-10% от мощности системы отопления, 30-50% при 50% заполнении храма, и 70-80% при полном заполнении храма. При горении всех свечей в храме выделяется количество теплоты, превышающее мощность системы отопления в 1,2-1,9 раз.

2. Расчеты систем аэрации в храме следует вести для трех периодов года: холодного, теплого и переходного, учитывая преобладающее направление и скорость ветра, для обеспечения более стабильных значений параметров микроклимата.

3. При расчете систем аэрации следует обратить внимание на наличие световых проемов в барабанах и отсутствие полностью замкнутого свода между молельным залом и барабанами, поскольку расположенные вытяжные фрамуги в этих световых проемах будут работать наиболее эффективно.

4. В большинстве случаев площади фрамуг, полученные для теплого периода года, превосходят по величине площади фрамуг для переходного и зимнего периодов на 30-40%.

## Заключение

Исследования по созданию и поддержанию требуемых параметров микроклимата в помещениях православных храмов были проведены в отношении теплового и воздушного режимов помещений и элементов конструкций.

Все вопросы, обобщенные в цели настоящей работы и подробно раскрытые в задачах исследований, а затем полученное их решение позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Согласно проведенным исследованиям температура воздуха над отопительным прибором составила 19,6-20,1°С, скорость воздуха 0,15-0,32 м/с в случае когда над отопительным прибором расположен оконный проем. Над отопительным прибором у глухой стены температура воздуха составила 21,5 °С, скорость воздуха – 0,37 м/с.

2. При описании движения восходящего конвективного потока вдоль внутренней поверхности наружного ограждения удобнее делить конструкцию на участки. При большом количестве световых проемов над отопительными приборами, стоит чередовать результаты, полученные при решении рассмотренным задач. За исходные данные принимаются значения, полученные над отопительным прибором.

3. Температура воздуха около свечей достигает 40-50 °С, однако уже на расстоянии 0,5 м над уровнем горения свечи остывает до 18 °С (зимний период), смешиваясь с воздухом внутри помещения. Скорость воздуха составляет 0,15 м/с.

4. В барабане храма температура воздуха различается в зависимости от близости к оконным проемам: в центре составляет 19,8 °С и вблизи закрытых оконных проемов составляет 17,1-17,3 °С. Скорость воздуха варьируется от 0,14-0,32 м/с.

5. При подсчете теплового баланса для православных храмов следует обязательно учитывать влияние тепловыделений от людей и свечей, поскольку

их значение сравнимо, или в некоторых случаях превосходит тепловыделения от систем отопления. Тепловыделения от людей при минимальном заполнении храма составляют 5-10% от мощности системы отопления, 30-50% при 50% заполнении храма, и 70-80% при полном заполнении храма. При горении всех свечей в храме выделяется количество теплоты, превышающее мощность системы отопления в 1,2-1,9 раз.

6. При расчете систем аэрации следует обратить внимание на наличие световых проемов в барабанах и отсутствие полностью замоноличенного свода между молельным залом и барабанами, поскольку расположенные вытяжные фрамуги в этих световых проемах будут работать наиболее эффективно.

7. В большинстве случаев площади фрамуг, полученные для теплого периода года, превосходят по величине площади фрамуг для переходного и зимнего периодов на 30-40%.

8. Подробные выводы по результатам испытаний в аэродинамической трубе:

При испытании церкви **Жен-Мироносиц** при восточном направлении ветра наблюдалось максимальное отрицательное значение (среди всех проведенных экспериментов) аэродинамического коэффициента в точке 20 (-2,05). Это обусловлено конструктивными особенностями алтарной части храма, а именно объединенными алтарями летней и зимней церквей, и расположением оконных проемов не параллельно направлению потока воздуха, а под углом  $45^\circ$  к потоку. При северном направлении ветра значение аэродинамического коэффициента в точке 20 также весьма существенно (-1,46), однако при данном направлении ветра интерес также представляет волнообразное изменение значений аэродинамических коэффициентов 36-39, где в точке 37 значение достигает -0,41, в то время как в оставшихся точках не превышает -0,18.

**Крестовоздвиженский собор:** при северном, западном, восточном и южном направлениях на пути ветрового потока всегда располагался фальшбарабан, который оказывал влияние на значение аэродинамических коэффициентов у центрального барабана храма. Поэтому положительные значения аэродина-

мических коэффициентов проявлялись только, например, при испытании для северного направления ветра для северо-восточной и северо-западной точек, соответственно точки 22 и 24. При испытании при северо-западном, северо-восточном, юго-западном и юго-восточном направлении ветра положительные значения аэродинамические коэффициенты принимали только в направлении движения потока, то есть для северо-западного направления движения ветра это северо-западная точка барабана храма №24.

**Рождественская церковь:** при южном направлении ветра следует отметить волнообразное изменение значений аэродинамических коэффициентов в точках 11-17 (от +0,38 до +0,82). Такие значения обусловлены наличием загородительных сооружений, влияющих на движение потока воздуха, в то время как в случае их отсутствия, коэффициенты колебались бы более равномерно в диапазоне от +0,7 до +1,0 (как это происходит при испытании неогороженной стены храма при северном направлении ветра). Следует также отметить волнообразное изменение аэродинамических коэффициентов вдоль южной стены по сравнению с утихающим изменением неогороженной северной при восточном направлении ветра.

**Спасо-Преображенский собор:** при восточном направлении ветра стоит отметить положительные значения аэродинамических коэффициентов в точках 31,45,48,49, (+0,67;+0,85;+0,51;+0,82 соответственно), несмотря на расположение с заветренной стороны, ввиду аэродинамических особенностей храмов неовизантийского стиля [5,6]. При юго-восточном направлении ветра (рис.8.) особый интерес представляет алтарная область, поскольку в отличие от церквей Рождественской и Жен-Мироносиц Спасо-Преображенский собор имеет в плане не полукруглый алтарь, а алтарь в виде половины десятиугольника.

Проведенные исследования позволяют более точно рассчитать площади приточных и вытяжных фрамуг в православных храмах, что обеспечит создание требуемых метеорологических условий в храмах и обеспечит сохранность этих памятников истории и архитектуры.

**Библиографический список.**

1. Абрашкин А.А. Вихревая динамика в лагранжевом описании / А.А. Абрашкин, Е.И. Якубович. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 176 с.
2. АВОК Стандарт–2–2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введ. 2004-06-09. – М. : АВОК, 2004. – 14 с : ил
3. Агафонов, С.Л. Горький. Балахна. Макарьев. Архитектурно-художественные памятники старинных волжских городов XIII-XX веков / С.Л. Агафонов.-2-е изд., исправл. и доп. – М.: Искусство, 1987. – 327 с.: ил.
4. Акинчев, Н.В. К вопросу расчета аэрации горячих цехов / Н.В. Акинчев // Водоснабжение и санитарная техника. - 1959. - № 2. - С. 10-13.
5. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль. Учебное пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1987. – 413 с.: ил.
6. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости : учеб. пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселёв. – М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
7. Аржаников, Н. С. Аэродинамика / Н.С. Аржаников, В. Н. Мальцев. – М. : Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1956. – 484 с. : ил.
8. Барановский, Г. В. Архитектурная энциклопедия второй половины XIX века. Т. 1. Архитектура исповеданий / Г. В. Барановский. – М. : Арт-Родник, 2006. – 500 с : ил.
9. Батурин, В. В. Аэрация промышленных зданий / В. В. Батурин, В. М. Эльтерман. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Госстройиздат, 1963. – 320 с. : ил.
10. Батурин, В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. – 4-е изд, сокр. – М. : Профиздат, 1990. – 448 с.: ил.
11. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : Олден-полиграфия, 2003. – 140 с.

12. Биркгоф, Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие : пер. с англ. / Г. Биркгоф. – 2-е изд. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – 245 с. : ил.
13. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика: Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха : учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Н. Богословский. – М. : Высш. шк., 1982. – 415 с. : ил.
14. Богословский, В. Н. Аспекты создания здания с эффективным использованием энергии / В. Н. Богословский // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2000. – № 5. – С. 34-39.
15. Богословский, В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В. Н. Богословский, М. Я. Поз. – М. : Стройиздат, 1983. – 320 с.
16. Богословский, В. Н. Отопление : учеб. для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Сканави. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с. : ил.
17. Богословский, В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с. : ил.
18. Богословский, В. Н. Выбор расчетных характеристик наружных климатических условий по коэффициенту обеспеченности заданного теплового режима помещений / В. Н. Богословский, В. П. Титов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1969. – № 11. – С. 19-24.
19. Богуславский, Л. Д. Зависимость сопротивления теплопередаче заполнения световых проемов гражданских зданий от коэффициента остекления наружных стен / Л. Д. Богуславский, Б. А. Крупнов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1973. – № 3. – С. 16-19.
20. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л. Д. Богуславский. – М. : Стройиздат, 1982. – 256 с. : ил.

21. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции / Л. Д. Богуславский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1985. – 336 с. : ил.
22. Бодров, В. И. Создание микроклимата экологически чистых сооружений / В. И. Бодров, А. Г. Кочев, Р. А. Дудник // Известия жилищно-коммунальной академии. Сер. “Городское хозяйство и экология”. – 1996. – № 4. – С. 24-30.
23. Бодров, В. И. Определение положения оконных переплетов в конструкциях стен уникальных сооружений / В. И. Бодров, А. Г. Кочев, А. С. Сергиенко // Строительный комплекс – 97 : тез. докл. науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, аспирантов и студентов. Ч. 5. Исследования по рациональному использованию природных ресурсов и защите окружающей среды ; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 1997. – С. 87-88.
24. Болгарский, А. В. Термодинамика и теплопередача : учеб. для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – М. : Высш. шк., 1975. – 295 с. : ил.
25. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Изд. 13-е, испр. – М. : Наука, 1986. – 545 с.
26. Бромлей, М. Ф. Проектирование отопления и вентиляции производственных зданий / М. Ф. Бромлей, В. П. Щеглов. – М. : Стройиздат, 1965. – 260 с. : ил.
27. Бубнов, Ю. Н. Архитектура Нижнего Новгорода середины XIX – начала XX века / Ю. Н. Бубнов. – Н. Новгород : Волго-Вят. кн. изд-во, 1991. – 176 с. : ил.
28. Бункин, К. А. Давление ветра на крыши и стены зданий / К. А. Бункин, А. М. Черемухин // Труды / Центр. аэро-гидродинам. ин-т. – 1928. – Вып. 35. – 78 с. : ил.
29. Бурдун, Г. Д. Справочник по Международной системе единиц / Г. Д. Бурдун. – 3-е изд., доп. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 232 с.

30. Бутурлинцев, В. Б. Влияние и роль аэрации в русской народной деревянной культовой архитектуре ХУП-ХУШ вв. : в 2 т. : дис. ... канд. архитектуры / В. Б. Бутурлинцев ; Моск. архитектур, ин-т. — М., 1988. — 286 с. : ил.

31. Бутурлинцев, В. Б. Выбор места постановки деревянного культового строения и ориентация его воздухоприточных проемов в зависимости от климатических факторов местности / В. Б. Бутурлинцев // Известия вузов. Сер. “Строительство”. — 1996. — № 9. — С. 137-140.

32. Бутурлинцев, В. Б. Зависимость перемещения потока воздуха внутри деревянной культовой постройки от расположения и ориентации наружных проемов / В. Б. Бутурлинцев // Известия вузов. Сер. “Строительство”. — 1996. — № 12. — С. 101-104.

33. Бухбиндер, М. М. Графоаналитический способ расчета площадей аэрационных проемов / М. М. Бухбиндер, М. М. Елин // Проектирование отопительно-вентиляционных систем и систем внутреннего водопровода и канализации : науч.-техн. реферат. сб. — М., 1980. — Вып. 1(151). — 32 с. : ил. — (Сер. 21).

34. Варапаев, В. Н. Исследование задач внутренней аэродинамики и теплообмена зданий : дис. ... доц. физ.-мат. наук : 01.02.05 / В. Н. Варапаев ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. — М., 1993. — 369 с. : ил.

35. Васильев, Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий / Б. Ф. Васильев. — М. : Госстройиздат, 1957. — 210 с.

36. Волосевич, П. П. Автомодельные решения задач газовой динамики и теплопереноса / П. П. Волосевич, Е.И. Леванов ; Моск. физико-техн. ин-т. — М. : МФТИ, 1997. — 240 с.

37. Волчков, Э. П. Пристенные газовые завесы / Э. П. Волчков. — Новосибирск : Наука, 1983. — 241 с. : ил.

38. Власов, О. Е. Основы строительной теплотехники / О. Е. Власов. — М. : ВИА РКК, 1933. — 286 с.

39. Влит, Н. Экспериментальное исследование турбулентных пограничных слоёв в условиях естественной конвекции / Н. Влит, С. Лайю // Труды

Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1969. – № 4. – С. 73.

40. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 1. Отопление / В. Н. Богословский, Б. А. Крупнов, А. Н. Сканава [и др.] ; под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1990. – 344 с.: ил. – (Справочник проектировщика).

41. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / В. Н. Богословский, А. И. Пирумов, В. Н. Посохин [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М., Стройиздат, 1992. – 319 с. : ил. – (Справочник проектировщика).

42. Возняк, Е. Р. Архитектура современной православной приходской церкви (на примере Санкт-Петербурга) : дис. ... канд. архитектуры / Е. Р. Возняк ; Санкт-Петерб. зон. науч.-исслед. и проект. ин-т жилищ.-гражд. зданий. – СПб., 1996. – 205 с. : ил.

43. Гао, Д. Локально неавтомодельное решение задачи о ламинарной свободной конвекции / Д. Гао // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1976. – № 2. – С. 185.

44. Гебхарт, Б. Неустановившаяся свободная конвекция от вертикальных элементов / Б. Гебхарт // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1961. – № 1. – С. 79.

45. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – М. : Metallургия, 1978. – 112 с. : ил.

46. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер. – М. : Metallургия, 1974. – 250 с. : ил.

47. Горских, С. А. Вопросы струйной теплозащиты светопрозрачных ограждений / С. А. Горских // Научно-технические проблемы систем теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения : межвуз. сб. науч. тр. ; Воронеж. гос. архитектур.-строит. акад. – Воронеж, 2000. – С. 33-35.

48. Горлин, С. М. Аэромеханические измерения. Методы и приборы / С. М. Горлин, И. И. Слезингер. – М. : Наука, 1964. – 720 с.
49. Горшенин, Д. С. Методы и задачи практической аэродинамики / Д. С. Горшенин, А. К. Мартынов. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с. : ил.
50. ГОСТ 8.417-81. Единицы физических [Электронный ресурс]. – Введ. 1981-03-19. – Режим доступа : <http://www.docload.ru/Basesdoc/11/11509/index.htm>.
51. Грёбер, Э. Основы учения о теплообмене / Эрк Грёбер. – Л. ; М. : Госэнергоиздат, 1936. – 410 с.
52. Грабарь, И. История русского искусства. Архитектура. Т. 1. История архитектуры. До-петровская эпоха / И. Грабарь ; Вь обраб. отдъл. ч. изд. приняли участие А. Бенуа [и др.]. – М. : Кнебель, [б. г.]. – 511 с. : ил.
53. Грабарь, И. История русского искусства. Архитектура. Т. 2. История архитектуры. До-петровская эпоха. (Москва и Украина) / И. Грабарь ; Вь обраб. отдъл. ч. изд. приняли участие А. Бенуа [и др.]. – М. : Кнебель, [б. г.]. – 480 с. : ил.
54. Гримитлин, М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – М. : Стройиздат, 1982. – 164 с. : ил.
55. Гришечко-Климов, С. М. Промышленное отопление и промышленная вентиляция / С. М. Гришечко-Климов. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1932. – 118 с. : ил.
56. Гришечко-Климов, С. М. Простейшие способы устройства вентиляции в жилых помещениях / С. М. Гришечко-Климов ; с предисл. и под ред. В. Ф. Дмитриева. – М. : Крас. Звезда, 1925. – 63 с.: ил.
57. Громов, В. В. Вентиляция помещений через окна / В. В. Громов, В. А. Татаринова // Жилищное строительство. – 1963. – № 6. – С. 29-31.
58. Гудерлей, К. Г. Теория около звуковых течений / К. Г. Гудерлей. – М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – 422 с.

59. Грязнов, В. Л. Численное моделирование турбулентной конвекции в вертикальном слое / В. Л. Грязнов, В. И. Полежаев // Известия АН СССР. Сер. “Механика жидкости газа”. – 1977. – № 5. – С. 8-15.
60. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия : учеб. пособие / А. А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Высш. шк., 1973. – 296 с. : ил.
61. Гухман, А. А. Об основаниях термодинамики / А. А. Гухман. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 384 с. : ил.
62. Гухман, А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. Процессы переноса в движущейся среде / А. А. Гухман. – М. : Высш. шк., 1974. – 328 с.
63. Гухман, А. А. Физические основы теплопередачи. В 4 т. Т. 1. Теория подобия и её приложение / А. А. Гухман. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1934. – 315 с.
64. Джалурия, Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен : пер. с англ / Й. Джалурия. – М. : Мир, 1983. – 400 с. : ил.
65. Джишке, В. Точное решение уравнений Буссинеска для бесконечной стенки в стратифицированной жидкости / В. Джишке // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1977. – № 1. – С. 186.
66. Дмитриева, Л. С. Планирование эксперимента в вентиляции и кондиционировании воздуха : учебник / Л. С. Дмитриева, Л. В. Кузьмина, Л. М. Мошкарнев. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1984. – 210 с. : ил.
67. Дроздов, В. Ф. Отопление и вентиляция : учеб. пособие для вузов. В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция / В. Ф. Дроздов. – М. : Высш. шк., 1984. – 263 с.
68. Дорренс, У. Х. Гиперзвуковые течения вязкого газа : пер. с англ. / У. Х. Дорренс. – М. : Мир, 1966. – 438 с. : ил.
69. Захаров, Ф. И. Аэрация промышленных зданий / Ф. И. Захаров. – М. ; Л. : Стандартизация и рационализация, 1933. – 86 с. : ил.
70. Ивлеев, В. М. Численное моделирование турбулентных течений / В. М. Ивлеев. – М. : Наука, 1990. – 216 с.

71. Измерение параметров газообразных и жидких сред при эксплуатации инженерного оборудования зданий : справ. пособие / А. А. Поляков, В. А. Канава, Г. Н. Бобровников [и др.] ; под ред. А. А. Полякова. – М. : Стройиздат, 1987. – 352 с. : ил.

72. Ивакин, В. П. Исследование структуры турбулентного пограничного слоя при естественной конвекции у вертикальной пластины / В. П. Ивакин, А. Г. Кирдяшкин, Л. И. Черняховский // Пристенное турбулентное течение : сборник. – Новосибирск, 1975. – Ч. 2. – С. 256-269.

73. Иконников, А. В. Тысяча лет русской архитектуры. Развитие традиций / А. В. Иконников. – М. : Искусство, 1990. – 385 с. : ил.

74. Ильинский, В. М. Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учетом физико-климатических воздействий) / В. М. Ильинский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1964. – 295 с. : ил.

75. Ильинский, В. М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий) : учеб. пособие для инж.-строит. вузов / В. М. Ильинский. – М. : Высш. шк., 1974. – 320 с. : ил.

76. Ильченко, О. Т. Расчеты теплового состояния конструкций : справочник / О. Т. Ильченко. – Харьков : Вища шк., 1979. – 168 с. : ил.

77. Инженерное оборудование зданий и сооружений : учеб. для вузов по специальности "Архитектура" / Ю. А. Табунщиков, Л. П. Голубничий, Ю. Н. Ефимов [и др.] ; под ред. Ю. А. Табунщикова. – М. : Высш. шк., 1989. – 238 с.

78. Исследование внешней аэродинамики здания : метод. указания к лаб. работам по дисциплине "Вентиляция" для студентов специальности 29.07.00 "Теплогазоснабжение и вентиляция" днев. и заоч. форм. обучения / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т., Каф. "Отопление и вентиляция" ; сост. А. Г. Кочев [и др.]. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2004. – 24 с. : ил.

79. Исаченко, В. П. Теплопередача : учеб. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с. : ил.

80. Каменев, П. Н. Динамика потоков промышленной вентиляции / П. Н. Каменев. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1938. – 360 с. : ил.
81. Каменев, П. Н. Отопление и вентиляция. В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция / П. Н. Каменев. – М. : Стройиздат, 1966. – 480 с.
82. Као, С. Свободная конвекция вдоль неизотермической вертикальной плоской пластины / С. Као, Д. Домото, М. Элрод мл. // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1977. – № 1. – С. 76.
83. Киреев, В. И. Численное моделирование газодинамических течений / В. И. Киреев, А. С. Войновский ; Моск. авиац. ин-т. – М. : МАИ, 1991. – 254 с. : ил.
84. Киссин, М. И. Отопление и вентиляция. Ч. 2. Вентиляция / М. И. Киссин. – М. : Гос. изд-во строит. лит., 1949. – 266 с. : ил.
85. Клиндт, Л. Стекло в строительстве: Свойства. Применение. Расчеты / Л. Клиндт, В. Клейн ; пер. с нем. П. И. Глазунова [и др.] ; под ред. И. П. Трохимовской, Ф. Л. Шехтера. – М. : Стройиздат, 1981. – 287 с. : ил.
86. Клиндт, Л. Конструкции окон / Л. Клиндт, Х. Фрезе ; пер. с нем. В. Г. Бердичевского ; под ред. И. В. Строкова. – М. : Стройиздат, 1987. – 112 с. : ил.
87. Коркин, В. Д. Англо-русский русско-английский словарь : слов. техн. терминов и словосочетаний по отоплению, вентиляции, охлаждению, кондиционированию, теплоснабжению и строит. теплофизике. / В. Д. Коркин, Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2001. – 340 с.
88. Корнилов, В. И. Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях / В. И. Корнилов. – Новосибирск : Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 2000. – 399 с. : ил.
89. Кочев, А. Г. Расчёт температурного режима ограждающих конструкций уникальных сооружений методом дробных шагов / А. Г. Кочев, С. А. Макаревич // Известия вузов. Сер. “Строительство”. – 1994. – № 4. – С. 61-62.
90. Кочев, А. Г. Особенности обеспечения микроклимата в строящихся, восстанавливаемых и реконструируемых культовых сооружениях / А. Г. Кочев // Известия вузов. Сер. “Строительство”. – 1997. – № 8. – С. 62-65.

91. Кочев, А. Г. Условия создания микроклимата экологически чистых сооружений / А. Г. Кочев // Известия вузов. Сер. "Строительство". – 1997. – № 6. – С. 91-95.

92. Кочев, А. Г. Задачи, решаемые при разработке микроклиматических условий в церквах / А. Г. Кочев // Известия вузов. Сер. "Строительство". – 1999. – № 6. – С. 88-93.

93. Кочев, А. Г. Исследование температурного режима оконных откосов в условиях нестационарного теплообмена / А. Г. Кочев, А. С. Сергиенко // Научно-технические проблемы систем теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения : межвуз. сб. науч. тр. / Воронеж. гос. архитектур.-строит. акад. – Воронеж, 2000. – С. 15-20.

94. Кочев, А. Г. Исследование влияния аэродинамических параметров на естественный воздухообмен в церквах / А. Г. Кочев, Ю. В. Осипов, А. С. Сергиенко // Известия вузов. Сер. "Строительство". – 2001. – № 7. – С. 73-76.

95. Кочев, А. Г. Температурное поле и теплопотери стены, примыкающей к оконному откосу / Г. М. Казаков, А. Г. Кочев, А. С. Сергиенко // Известия вузов. Сер. "Строительство". – 2003. – № 10. – С. 118-124.

96. Кочев, А. Г. Инженерная методика расчета требуемого воздухообмена в православных храмах / А. Г. Кочев, Ю. В. Осипов // Известия вузов. Сер. "Строительство". – 2004. – № 3. – С. 63-67.

97. Кочев, А. Г. Микроклимат православных храмов : монография / А. Г. Кочев ; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2004. – 449 с. : ил.

98. Кочев, А. Г. Микроклимат православных храмов : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.23.03. / А. Г. Кочев ; науч. рук. В. И. Бодров ; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2005. – 475 с. : ил.

99. Красильщикова, Г. А. Зарождение экспериментальной аэродинамики : к 80-летию создания аэродинамической трубы Т-I-II ЦАГИ [Электронный ресурс] / А. Г. Красильщикова. – Режим доступа : <http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/VIET/TUBE/TUBE.HTM>.

100. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика. Ч. I. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла : учеб. для втузов / Н. Ф. Краснов. – М. : Высш. шк., 1976. – 384 с. : ил.
101. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика. Ч. 2. Методы аэродинамического расчета : учеб. для втузов / Н. Ф. Краснов. – М. : Высш. шк., 1980. – 416 с. : ил.
102. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика отрывных сечений : учеб. для втузов / Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой, В. Т. Калугин. – М. : Высш. шк., 1988. – 351 с. : ил.
103. Крайнов, В. П. Качественные методы в физической кинетике и гидрогазодинамике : учеб. пособие для физ. специальностей вузов / В. П. Крайнов. – М. : Высш. шк., 1989. – 224 с. : ил.
104. Красноперов, Е. В. Экспериментальная аэродинамика. В 4 ч. Ч. 2. Опытные данные о силах сопротивления тел простейших форм / Е. В. Красноперов. – Л. ; М. : Гл. ред. авиац. лит, 1935. – 192 с. : ил.
105. Кувшинов, Ю. Я. Круглогодичный тепловой режим зданий и расход энергии системами кондиционирования микроклимата : дис. ... канд. техн. наук / Ю. Я. Кувшинов ; науч. рук. В. Н. Богословский ; Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – М., 1973. – 175 с. : ил.
106. Кувшинов, Ю. Я. Энергосбережение при кондиционировании микроклимата гражданских зданий : дис. ... канд. техн. наук / Ю. Я. Кувшинов ; науч. рук. В. Н. Богословский ; Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – 1989. – 472 с. : ил.
107. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Изд. 5-е, доп. – М. : Атомиздат. – 1979. – 416 с. : ил.
108. Кучерук, В. В. Аэрация / В. В. Кучерук. – М. : Профиздат, 1938. – 6 с. : ил.
109. Кучерук, В. В. Регулирование аэрации / В. В. Кучерук. – М.: Профиздат, 1937. – 15 с. : ил.
110. Кэйс, В. М. Конвективный тепло- и массообмен / В. М. Кэйс ; пер. с англ. И. Н. Дулькина. – М. : Энергия, 1972. – 446 с. : черт.

111. Ландау, Л. Д., Теоретическая физика. В. 10 т. Т. 6. Гидродинамика / Д. Л. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Изд. 3-е, перераб. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
112. Ларичкин, В. В. Исследование аэродинамики цилиндрических тел и башенных градирен : дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Ларичкин. – Новосибирск, 2013. – 400 с.
113. Липанов, А. М. Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков / А. М. Липанов, Ю. Ф. Кисаров, И. Г. Ключников. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 164 с.
114. Лойцянский, Л. Г. Ламинарный пограничный слой / Л. Г. Лойцянский. – М. : Физматгиз, 1962. – 427 с.
115. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
116. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1972. – 560 с. : ил.
117. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с. : ил.
118. Лычев, А. С. Статистическая обработка опытных данных и планирование эксперимента : учеб. пособие / А. С. Лычев, В. В. Дмитриев ; Куйбышев. гос. ун-т. – Куйбышев : КГУ, 1977. – 69 с. : ил.
119. Льюис, М. Пористая аналитическая модель течения для расчёта термодинамических характеристик шероховатых поверхностей / М. Льюис // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1975. – № 2. – С. 96.
120. Льюис, М. Экспериментальное исследование массообмена в условиях естественной конвекции на вертикальной пластине при инжекции на поверхности / М. Льюис, В. Навотный, Д. Ян // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1977. – № 3. – С. 108.
121. Мак-Адамс, К. Теплопередача / К. Мак-Адамс. – Л. ; М. : Стройиздат Наркомстроя, 1936. – 90 с.

122. Макаревич, С. А. Тепловой режим полов и заглубленных частей зданий : дис. ... канд. тех. наук / С. А. Макаревич ; Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1990. – 217 с. : ил.

123. Макарий, архимандрит. Памятники церковных древностей / архимандрит Макарий. – Н. Новгород : Нижегород. ярмарка, 1999. – 701 с. : ил.

124. Мартынов, А. К. Экспериментальная аэродинамика / А. К. Мартынов. – М. : Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1950. – 479 с. : ил.

125. Математическое моделирование микроклимата зданий. – М. : ЦНТИ по гражд. стр-ву и архитектуре, 1970. – 104 с.

126. Математическое моделирование. Нелинейные дифференциальные уравнения математической физики : сб. ст. АН СССР. – М. : Наука, 1987. – 279 с. : ил.

127. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Вerezуб [и др.]. – М. : Наука, 1987. – 274 с. : ил.

128. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т. 1. Идея и образ. – Введ. 2003-01-01. – М. : Арххрам, 2003. – 338 с. : ил.

129. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т. 2. Православные храмы и комплексы. – Введ. 2003-01-01. – М. : Арххрам, 2003. – 182 с. : ил.

130. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т. 3. Примеры архитектурно-строительных решений. – Введ. 2003-01-01. – М. : Арххрам, 2003. – 201 с. : ил.

131. Микроклимат зданий и сооружений / В. И. Бодров, М. В. Бодров, Н. А. Трифонов, Т. Н. Чурмеева ; под ред. В. И. Бодрова. – Н. Новгород : Арабеск, 2001. – 394 с. : ил.

132. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева – Изд. 2-е, стереотип. – М. : Энергия, 1977. – 344 с. : ил.

133. Монин, А. С. Статистическая гидромеханика: механика турбулентности. В 2 ч. Ч. 1 / А. С. Монин, А. М. Яглом. – М. : Наука, 1965. – 640 с. : ил.

134. Монин, А. С. Статистическая гидромеханика: механика турбулентности. В 2 ч. Ч. 2 / А. С. Монин, А. М. Яглом. – М. : Наука, 1967. – 720 с. : ил.

135. Навой, Д. Экспериментальное исследование поля скоростей при свободной конвекции над горизонтальным линейным источником тепла / Д. Навой, П. Хикман // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1977. – № 4. – С. 111.

136. Нагорский, Д. В. Промышленная вентиляция / Д. В. Нагорский. – М.; Л. : Гос. изд-во экон. лит, 1932. – 64 с. : ил.

137. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с. : ил.

138. Некрасов, А. И. Очерки по истории древнерусского зодчества XI–XVII века / А. И. Некрасов. – М. : Всесоюз. акад. архитектуры, 1936. – 400 с. : ил.

139. НПБ 108-96. Культовые сооружения. Противопожарные требования : утв. ГУГПС МВД России ; Фил. ВНИИПО МВД России : введ. в д. с 01.07.96. – М. : [б. и.], 1996. – 6 с.

140. Патанкар, С. Тепло- и массообмен в пограничных слоях : пер. с англ. / С. Патанкар, Д. Сполдинг. – М. : Энергия, 1971. – 128 с. : ил.

141. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ. / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 124 с. : ил.

142. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по высшей математика. В 2 ч. Ч. 1 / Д. Т. Письменный. – 2-е изд., испр. – М. : Айрис-пресс, 2003. – 288 с. : ил.

143. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по высшей математика. В. 2 ч. Ч. 2 / Д. Т. Письменный. – 2-е изд., испр. – М. : Айрис-пресс, 2003. – 256 с. : ил.

144. Поляков, В. В. Методические указания к лабораторной работе «Исследования внешней аэродинамики здания» / В. В. Поляков. – М. : МИСИ, 1977. – 25 с.

145. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика : пер. с нем. / Л. Прандтль. – Ижевск : Регуляр. и хаот. динамика, 2000. – 576 с.

146. Пэнкхерст, Р. Техника эксперимента в аэродинамических трубах : пер. с англ. / Р. Пэнкхерст, Д. Холдер ; под ред. С. Г. Попова. – М. : Изд-во иностр. лит., 1955. – 666 с. : ил.
147. Овсяников, Л. В. Лекции по основам газовой динамики / Л. В. Овсяников. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютер.х исслед., 2003. – 336 с. : ил.
148. Осипов, Ю. В. Создание требуемых микроклиматических условий в храмах : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Ю. В. Осипов ; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 268 с.
149. Олдер, Б. Вычислительные методы в гидродинамике : пер. с англ. / Б. Олдер, С. Фернбах, М. Ротенберг. – М. : МИР, 1967. – 385 с. : ил.
150. Рейнольдс, А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях : пер с англ. / А. Дж. Рейнольдс. – М. : Энергия, 1979. – 408 с. : ил.
151. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.
152. Реттер, Э. И. Аэродинамика зданий / Э. И. Реттер, С. И. Стриженов. – М. : Стройиздат, 1968. – 240 с.
153. Реттер, Э. И. Ветровая нагрузка на сооружения / Э. И. Реттер. – М. ; Л. : Гл. ред. строит. лит., 1936. – 215 с. : ил.
154. Реттер, Э. И. Аэродинамическая характеристика жилых зданий / Э. И. Реттер, Ф. Л. Серебровский // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2008. – № 5. – С. 81-87.
155. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен : пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1 / Б. Гибхарт, И. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Самакия. – М. : Мир, 1991. – 678 с. : ил.
156. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен : пер с англ. В 2 кн. Кн. 2. / Б. Гибхарт, И. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Самакия. – М. : Мир, 1991. – 528 с.: ил.
157. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – Изд. 8-е, перераб. – М. : Наука, 1977. – 440 с. : ил.

158. Седов, Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Т. 1 / И. Л. Седов. – М. : Наука, 1970. – 492 с.

159. Седов, Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Т. 2 / И. Л. Седов. – М. : Наука, 1970. – 568 с.

160. Сергиенко, А. С. Тепловой и воздушный режимы оконных проемов культовых сооружений на примере православных храмов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / А. С. Сергиенко ; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 283 с.

161. Соболева, О. Архитектура храмов Киевской Руси [Электронный ресурс] / О. Соболева // Мир православия. – 2003. - № 5 (62). – Режим доступа : <http://www.baltwillinfo.com/mp5-03/mp-14.htm>.

162. СП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. – Введ. 1999-12-27. – М. : Арххрам, 1999. – 38 с. : ил.

163. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология [Электронный ресурс] : строит. нормы и правила : утв. Госстроем России 11.06.1999 : взамен СНиП 2.01.01.-82 : введен в д. 01.01.2000 : [ред. от 24.12.2002]. – Режим доступа : КонсультантПлюс. Технические нормы и правила. Строительство.

164. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия [Электронный ресурс] : строит. нормы и правила : утв. Госстроем России 29.08.1985 : взамен СНиП П-6-74 : введен в д. 01.01.1987 : [ред. от 29.05.2003]. – Режим доступа : КонсультантПлюс. Технические нормы и правила.

165. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Электронный ресурс] : строит. нормы и правила : утв. Госстроем России 26.06.2003 : взамен СНиП П-3-79\* : введен в д. 01.10.2003. – Режим доступа : КонсультантПлюс. Технические нормы и правила.

166. Соколов, М. М. Особенности проведения эксперимента по исследованию внешней аэродинамики культовых сооружений / М. М. Соколов // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2009. – С.180-183.

167. Соколов, М. М. Энергосберегающие системы микроклимата в православных храмах / А. Г. Кочев, Е. Н. Семикова, М. А. Кочева, М. М. Соколов // Великие реки – 2009 : тр. конгр. Междунар. науч.-пром. форума / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2009. – С. 589-591.

168. Соколов, М. М. Развитие храмового зодчества в России и его влияние на аэродинамику культовых сооружений / М. М. Соколов // Промышленная безопасность : сб. науч.-произв. Исследование технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2010. – С. 321-325.

169. Соколов, М. М. Теоретическое обоснование выбора культовых сооружений для исследования их внешней аэродинамики / М. М. Соколов // Технические науки : сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2010. С. – 225-230

170. Соколов, М. М. Режимы работы систем вентиляции в православных храмах / А. Г. Кочев, А. С. Сергиенко, О. В. Федорова, М. М. Соколов // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы VIII Междунар. науч. конф. – Самарканд ; Волгоград, 2010. – С. 192-195.

171. Соколов, М. М. Актуальность исследований по созданию требуемых условий микроклимата в помещениях православных храмов / М. М. Соколов // Технические науки : тез. докл. XV Нижегородской сессии молодых ученых. – Н. Новгород, 2010. – С. 115-116.

172. Соколов, М. М. Влияние внешних аэродинамических характеристик на создание и поддержание требуемых параметров микроклимата в православных храмах / М. М. Соколов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1. – С. 407-412.

173. Соколов, М. М. Теоретические и экспериментальные исследования влияния внешних аэродинамических характеристик на параметры микроклимата в православных Храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2011. – №1 (17). – С. 58-65.

174. Соколов, М. М. Влияние критериев подобия на исследование внешней аэродинамики культовых сооружений / М. М. Соколов // Технические науки: сб. тр. аспирантов и магистрантов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2011. – С. 193-197.

175. Соколов, М. М. Аэродинамические испытания православных храмов / М. М. Соколов // Технические науки : докл. XVI Нижегород. сессии молодых ученых. – Н. Новгород, 2011. – С. 445-448.

176. Соколов, М. М. Применение энергосберегающих систем вентиляции в православных храмах / М. М. Соколов // Великие реки – 2011: тр. конгр. Междунар. науч.-пром. форума / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2011. – С. 297-300.

177. Соколов, М. М. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов / А. Г. Кочев, М. М. Соколов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2012. – № 2 (22). – С. 78-85.

178. Соколов, М. М. Применение энергосберегающих систем вентиляции в православных храмах / М. М. Соколов // Великие реки – 2012 : тр. конгр. Междунар. науч.-пром. форума / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2012.

179. Соколов, М. М. Особенности конструктивных решений православных храмов, влияющих на создание и поддержание требуемых параметров микроклимата / М. М. Соколов // Великие реки – 2012 : тр. конгр. Междунар. науч.-пром. форума / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2012. – С. 477-480.

180. Соколов, М. М. Исследование внешней и внутренней аэродинамики на естественную вентиляцию в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, А. С. Сергиенко // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды (Indoor air and environmental quality) : материалы XI Междунар. науч. конф., 23 марта–5 апр. 2013 г., г. Ханой / М-во образования и науки Рос. Федерации, Вол-

гогр. гос архит.-строит. ун-т, Нац. строит. ун-т г. Ханой, Рос. акад. архитектуры и строит. наук (РААСН) ; сост. А. Н. Гвоздков. – Волгоград, 2013. – С. 200-205.

181. Соколов, М. М. Расчет воздухообменов для осушки конструкций и аэрации в культовых зданиях / А. Г. Кочев, О. В. Федорова, М. М. Соколов // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 2013. – № 2-3. – С. 60-67.

182. Соляник, П. Н. Экспериментальная аэродинамика : учеб. пособие по лабораторному практикуму / П. Н. Соляник, М. Л. Сургайло, В. В. Чмовж. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 96 с.

183. Сполдинг, Д. Б. Конвективный массоперенос : пер. с англ. / Д. Б. Сполдинг ; под ред. А. В. Лыкова. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – 384 с. : ил.

184. Спэрроу, Ю. Локально неавтономные решения для теплового пограничного слоя / Ю. Спэрроу // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1971. – № 4. – С. 9.

185. Спэрроу, Ю. Метод решения уравнений пограничного слоя при отсутствии локальной автономности / Ю. Спэрроу, С. Коук, Г. Бернер // Ракетная техника и космонавтика. – 1970. – № 11. – С. 21.

186. Спэрроу, Ю. Развитие пристеночной и свободной конвективных струй на вертикальной нагретой пластине / Ю. Спэрроу, С. Патанкар, М. Абдель-Вахед // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1978. – № 2. – С. 10.

187. Спэрроу, Ю. Теплоотдача свободной конвекцией от верхней пластины из двух расположенных с зазором коллинеарных вертикальных пластин / Ю. Спэрроу, А. Фагхри // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1980. – № 4. – С. 41.

188. Талиев, В. Н. Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. – М. : Стройиздат, 1979. – 295 с. : ил.

189. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с. : ил.

190. Табунщиков, Ю. А. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 1998. – № 1. – С. 5-10.

191. Табунщиков, Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. – М. : Стройиздат, 1986. – 380 с. : ил.

192. Тепловой режим помещений памятников архитектуры (на примере соборов-музеев Московского кремля) / Ю. А. Табунщиков, В. Н. Дахно, И. С. Мельникова, В. Н. Проценко // Тепловой режим, теплоизоляция и долговечность зданий : сб. тр. / Науч.-исслед. ин-т строит. физики ; под ред. В. А. Дроздова. – М., 1979. – С. 10-18.

193. Темам, Р. Уравнение Навье-Стокса. Теория и численный анализ : пер. с англ. / Р. Темам. – М. : Мир, 1981. – 409 с.

194. Тимошенко, В. И. Сверхзвуковые течения вязкого газа / В. И. Тимошенко. – Киев : Наук. думка, 1987. – 184 с.

195. Титов, В. П. Воздушный режим здания : дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Титов ; Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – М., 1987. – 46 с. : ил.

196. Титьянс, О. Гидро- и Аэромеханика. По лекциям проф. Л. Прандтль : пер. с нем. В 2 т. Т. 1. Равновесие движения жидкостей без трения / О. Титьянс. – М. ; Ленинград : Гос. техн.-теорет. изд-во, 1933. – 224 с. : ил.

197. Титьянс, О. Гидро- и Аэромеханика. По лекциям проф. Л. Прандтль : пер. с нем. В 2 т. Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения / О. Титьянс. – М. ; Ленинград : Гос. техн.-теорет. изд-во, 1935. – 313 с. : ил.

198. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник : пер. с англ. / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.

199. Фабрикант, Н. Я. Аэродинамика / Н. Я. Фабрикант. – М. : Наука, 1964. – 816 с. : ил.

200. Филатов, Н. Ф. Купола, глядящие в небеса: Нижегородское храмовое зодчество XVII-XX в. : альбом / Н. Ф. Филатов ; Нижегород. ин-т экон. развития. – Н. Новгород : НИЭР, 1996. – 248 с. : ил.

201. Филатов, Н. Ф. Нижний Новгород. Архитектура XIV – начала XX в. / Н. Ф. Филатов ; отв. ред. Г. В. Гундарин. – Н. Новгород : Нижегород. новости, 1994. – 247 с. : ил.

202. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей : пер с англ. В 2 т. Т. 1. Основные положения и общие методы / К. Флетчер. – М. : Мир, 1991. – 504 с. : ил.

203. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей : пер с англ. В 2 т. Т. 2. Методы расчета различных течений / К. Флетчер. – М. : Мир, 1991. – 552 с. : ил.

204. Фрухт, И. А. Новые данные для расчета аэрации производственных помещений с избытками тепла / И. А. Фрухт., С. Ю. Диденко // Известия вузов. Сер. ‘Строительство и архитектура’. – 1959. – № 10. – С. 114-122.

205. Фрухт, И. А. Условия формирования температурного поля в производственных помещениях с источниками тепла, размещенными неравномерно по площади пола / И. А. Фрухт, С. Ю. Диденко // Известия вузов. Сер. ‘Строительство и архитектура’. – 1960. – № 2. – С. 127-131.

206. Фын, Я. Ц. Введение в теорию аэроупругости / Я. Ц. Фын. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 524 с.

207. Хмелюк, К. Д. Исследование теплообмена наружных стен в жилых зданиях : дис. ... канд. техн. наук / К. Д. Хмелюк ; Науч.-иссл. ин-т строит. техники. – Киев, 1956. – 162 с. : ил.

208. Храмцовский, Н. Краткий очерк истории и описание Нижнего Новгорода. В 2 ч. Ч. 2 / Н. Храмцовский. – Н. Новгород : Губерн. тип., 1859. – 224 с. : карт.

209. Хрулев, В. М. Обеспечение долговечности деревянных зданий зодчими Севера России / В. М. Хрулев, Ю. А. Варфоломеев, Л. Г. Шаповалова // Известия вузов. Сер. ‘Строительство’. – 1995. – № 4. – С. 111-114.

210. Чжэнь, И. Теплопередача свободной конвекцией от вертикальной поверхности к жидкости с неравномерным распределением температуры по вертикали / И. Чжэнь, С. Эйчхорн // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1976. – №3. – С. 112.

211. Численные методы исследования течений вязкой жидкости : пер. с англ. / А. Д. Госмен, В. М. Пан, А. К. Ранчел, Д. Б. Сполдинг, М. Вольфштейн. – М. : Мир, 1972. – 320 с. : ил

212. Цой, П. В. Методы расчёта отдельных задач тепломассопереноса / П. В. Цой. – М. : Энергия, 1971. – 384 с.

213. Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – Режим доступа : <http://www.tsagi.ru/rus/7>.

214. Черняк, В. Г. Механика сплошных сред : учеб. пособие для вузов / В. Г. Черняк., П. Е. Суетин. – М. : Физматлит, 2006. – 352 с.

215. Шепелев, И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / А. И. Шепелев. – М. : Стройиздат, 1978. – 144 с.

216. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 180 с. : ил.

217. Шмитц, Ф. В. Аэродинамика малых скоростей / Ф. В. Шмитц ; пер. А. А. Болонкина, В. Ю. Кохно. – М. : ДОСААФ, 1963. – 60 с. : ил.

218. Шумилкин, А. С. Архитектура купольных церквей Нижнего Новгорода первой половины XIX века / А. С. Шумилкин // Ученые записки ВВО МСА. – Н. Новгород, 2009. – Вып. № 24. – С. 95-98.

219. Шумилкин, А. С. Культовые постройки начала XX века в планировочной структуре Нижнего Новгорода и окрестностей / А. С. Шумилкин // Ученые записки ВВО МСА. – Н. Новгород, 2007. – Вып. № 20. – С. 119-127.

220. Эккерт, Э. Р. Введение в теорию тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт ; пер. с англ. И. А. Носенко ; под ред. А. В. Лыкова. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1957. – 280 с. : ил.

221. Эккерт, Э. Р. Изучение перехода ламинарного движения в турбулентное при свободной конвекции на вертикальной пластине / Э. Р. Эккерт, Е.

Зёнген, П. Ю. Шнайдер // Проблема пограничного слоя и вопросы теплопередачи : сб. оригинал. ст. / под общ. ред. Г. Гёртлера и В. Толлмина ; пер. с англ. В. А. Баума. – М. ; Л, 1960. – С. 349-359.

222. Экерт, Э. Р. Теория тепло- и массообмена : пер. с англ. / Э. Р. Экерт, Р. М. Дрейк ; под ред. А. В. Лыкова. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 681 с. : ил.

223. Экспериментальное моделирование в аэродинамике : лаб. практикум / С. В. Богословский, А. Д. Дорофеев, И. С. Зегжда, И. А. Любимов, Р. Н. Кошкин ; Санкт-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения.. – СПб. : СПб ГУАП, 2001. – 48 с. : ил.

224. Энциклопедия КОСМОНАВТИКА [Электронный ресурс]. – М. : Сов. энцикл., 1985. – Режим доступа : <http://www.space.hobby.ru/firsts/zhukovsky.html>.

225. Юделович, М. Я. Аэродинамическая труба [Электронный ресурс] / М. Я. Юделович. – Режим доступа : <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/085/503.htm>.

226. Янг, Н. Ламинарная свободная конвекция в вертикальной пластине с периодически изменяющейся температурой поверхности / Н. Янг, С. Скация, П. Гудмен // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1974. – № 1. – С. 8.

227. Яо, Г. Свободная конвекция вдоль вертикальной волнистой поверхности / Г. Яо // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1983. – № 3. – С. 43.

228. Яо, Г. Эффекты вторичного течения, обусловленного подъёмной силой в пограничном слое при продольном обтекании горизонтально расположенного нагреваемого полого цилиндра / Г. Яо, Р. Кэттон // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. С, Теплопередача. – 1977. – № 1. – С. 129.

229. Heating Piping & Air Conditioning. Теплопередача и кондиционирование воздуха. – 1964. –Т. 2. – 310 с.

230. Heating Piping & Air Conditioning. Теплопередача и кондиционирование воздуха. – 1964. – Т. 4. – 298 с.

231. Heating Piping & Air Conditioning. Теплопередача и кондиционирование воздуха. – 1967. – Т. 3. – 317 с.

## **Приложения**

## Приложение А. Результаты исследований температурных и скоростных полей в молельном зале православных храмов.

В данном приложении приводятся значения температурных и скоростных полей по высоте для различных случаев, определенные экспериментально.

1) радиатор + 2 окна

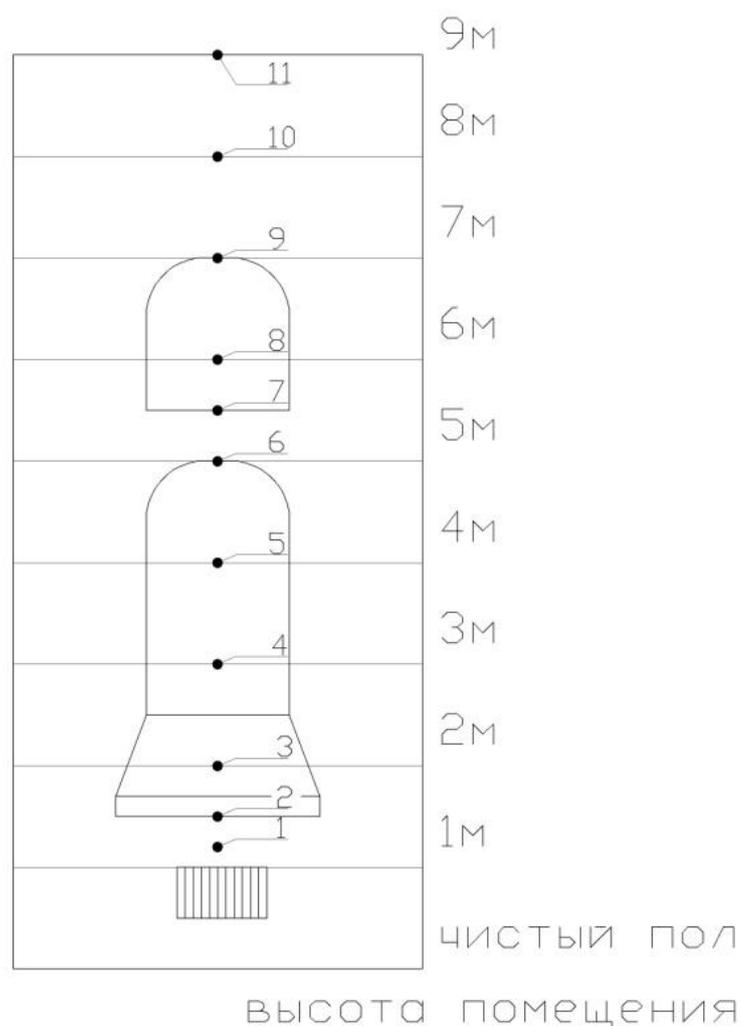


Рис А.1. Расстановка характерных точек исследования на наружной стене молельного зала, при наличии отопительного прибора и двух ярусов окон

Таблица А.1.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.1.

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемометра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,2	34	20,1	0,23
2	1,5	23,2	19,2	0,32
3	2,0	15,4	19,5	0,14
3`	2,5	13,6	19,6	0,21
4	3,0	13,4		
5	4,0	14,2		
6	5,0	15,2		
7	5,5	13,8		
8	6,0	12,4		
9	7,0	13,2		
10	8,0	14,4		
11	9,0	14,0		
12	Свод	15,2		

## 2) стена рядом с дверью

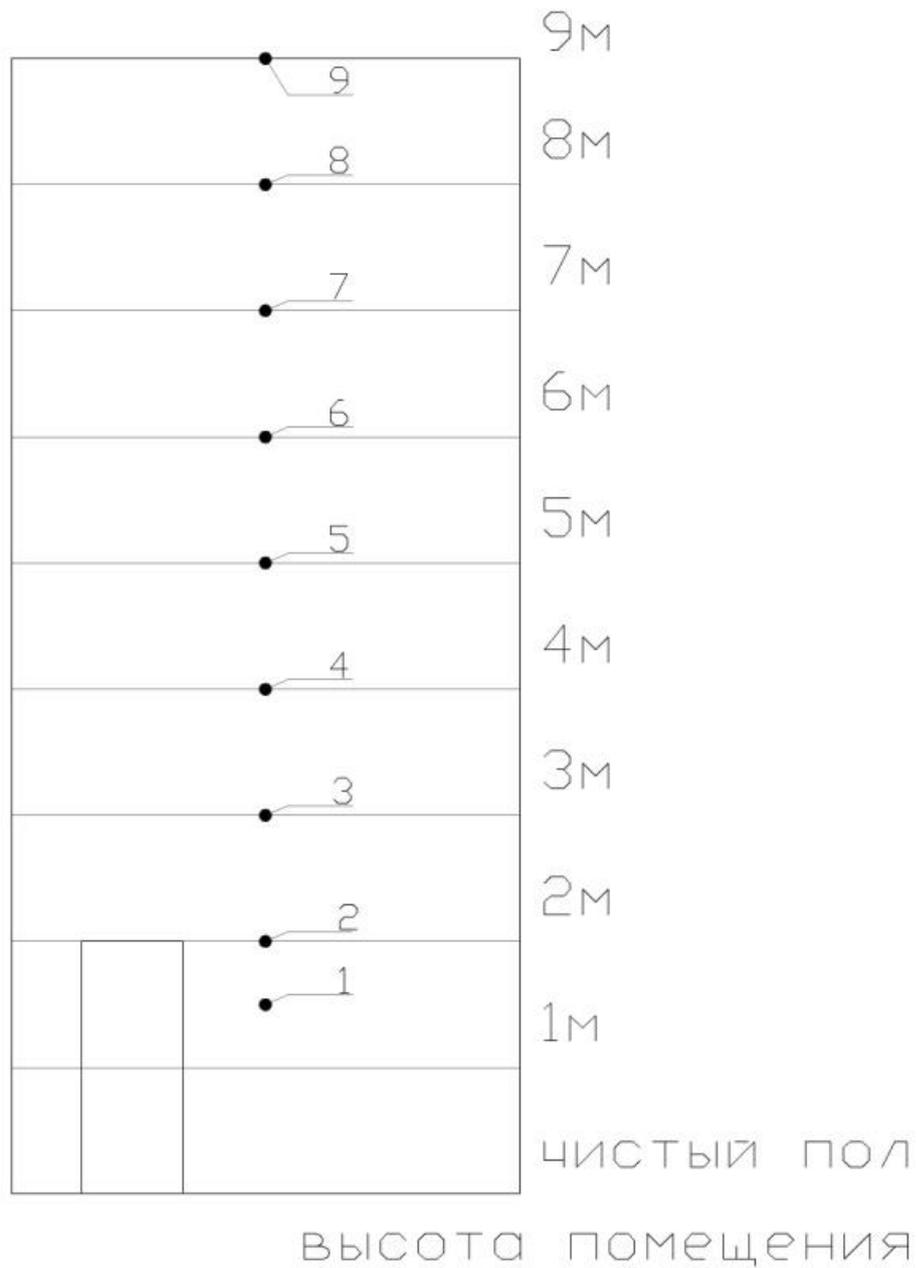


Рис А.2. Расстановка характерных точек исследования на наружной стене молельного зала около двери

Таблица А.2.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.2.

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,5	17,4	18,6	0,05-0,20
2	2,0	17,4		
3	3,0	17,4		
4	4,0	16,8		
5	5,0	16,8		
6	6,0	16,8		
7	7,0	16,6		
8	8,0	16,4		
9	9,0	15,6		
10	Свод	15,4		

## 3) колонна

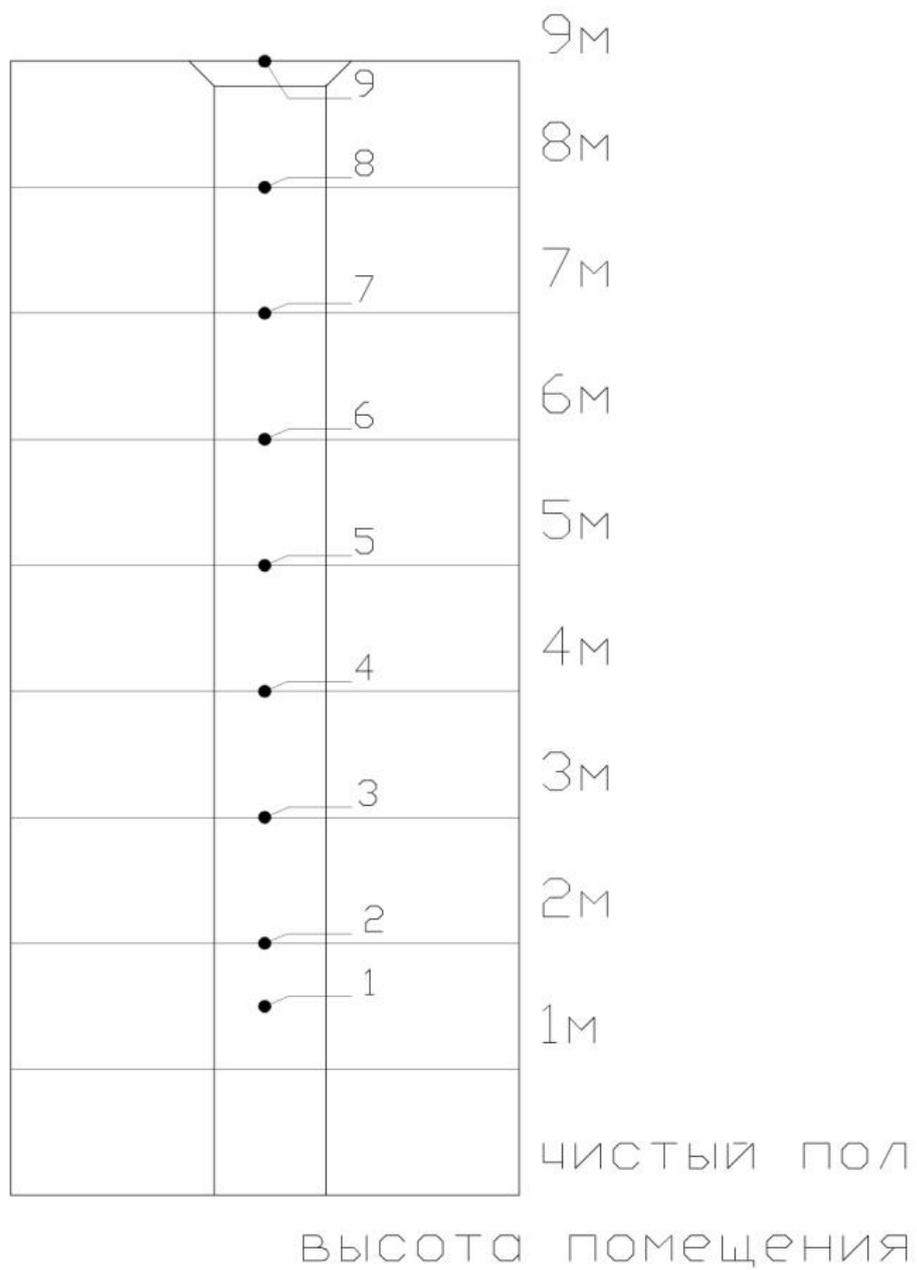


Рис А.3. Расстановка характерных точек исследования на колонне внутри молельного зала

Таблица А.3.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.3.

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,5	15,8	19,1	0,21
2	2,0	16,0		
3	3,0	15,8		
4	4,0	15,8		
5	5,0	15,6		
6	6,0	15,6		
7	7,0	15,8		
8	8,0	15,4		
9	9,0	15,6	17,5-17,9	0,02-0,04
10	Свод	15,2		

4) около радиатора + 2 окон

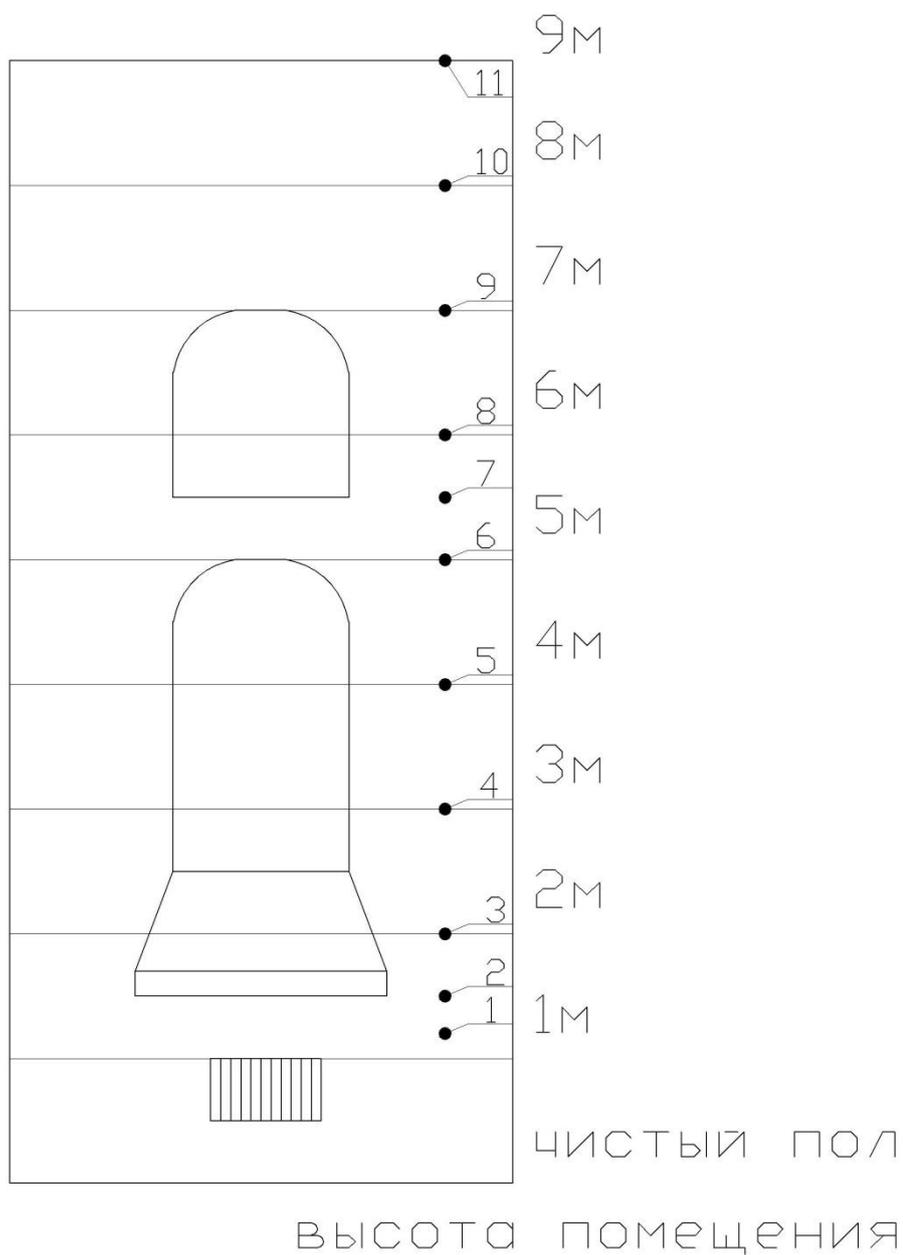


Рис А.4. Расстановка характерных точек исследования со смещением в сторону на наружной стене молельного зала, при наличии отопительного прибора и двух ярусов окон

Таблица А.4.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.4

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,2	16,6		
2	1,5	16,6		
3	2,0	15,4		
4	3,0	15,0		
5	4,0	14,8		
6	5,0	14,6		
7	5,5	14,6		
8	6,0	14,6		
9	7,0	14,6		
10	8,0	14,4		
11	9,0	14,2		
12	Свод	15,0		

## 5) РАДИАТОР

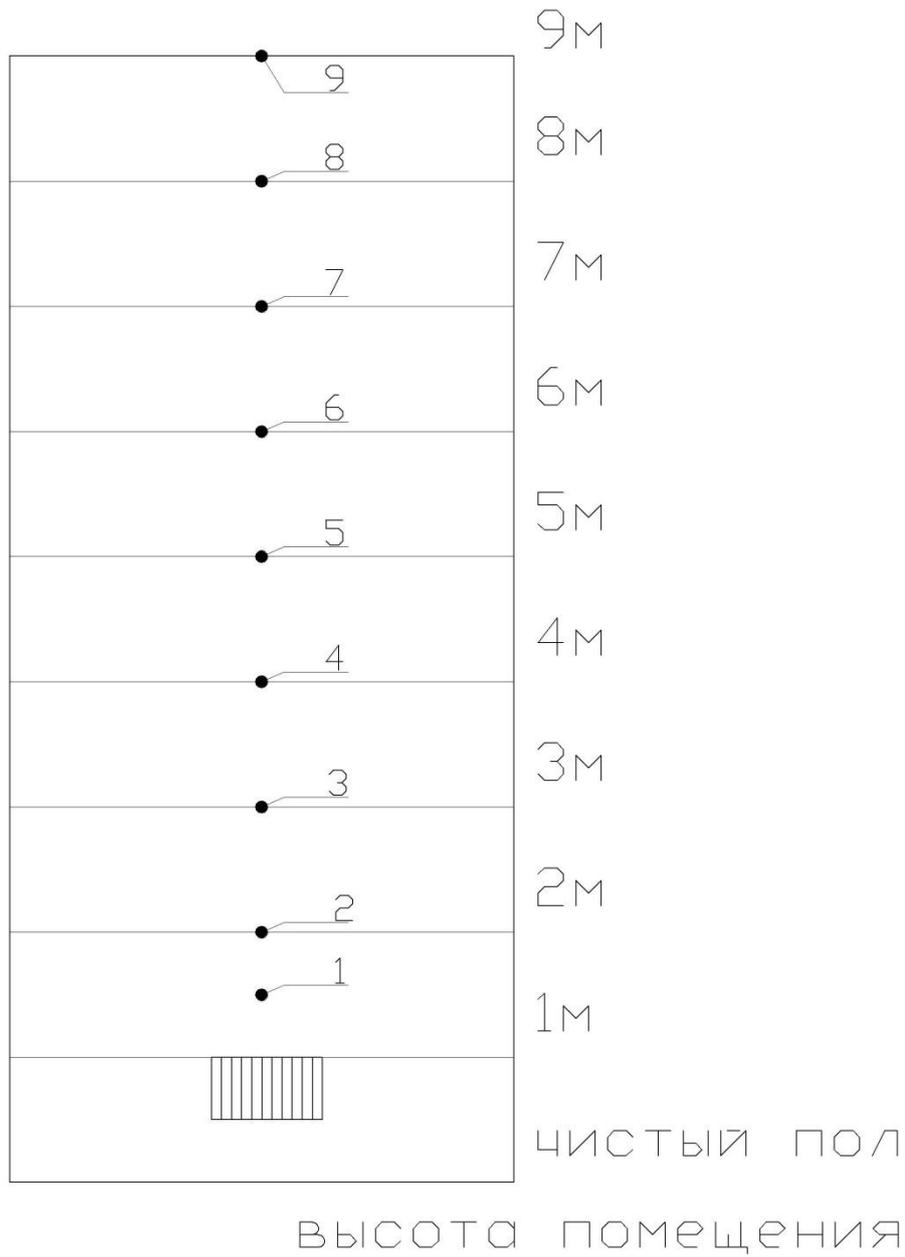


Рис А.5. Расстановка характерных точек исследования на наружной стене молельного зала при наличии отопительного прибора

Таблица А.5.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.5

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,5	25,6	21,5	0,37
2	2,0	16,6		
3	3,0	16,2		
4	4,0	15,6		
5	5,0	15,6		
6	6,0	15,4		
7	7,0	15,2		
8	8,0	14,8		
9	9,0	13,6		
10	Свод	14,6		

## 6) ОКНО

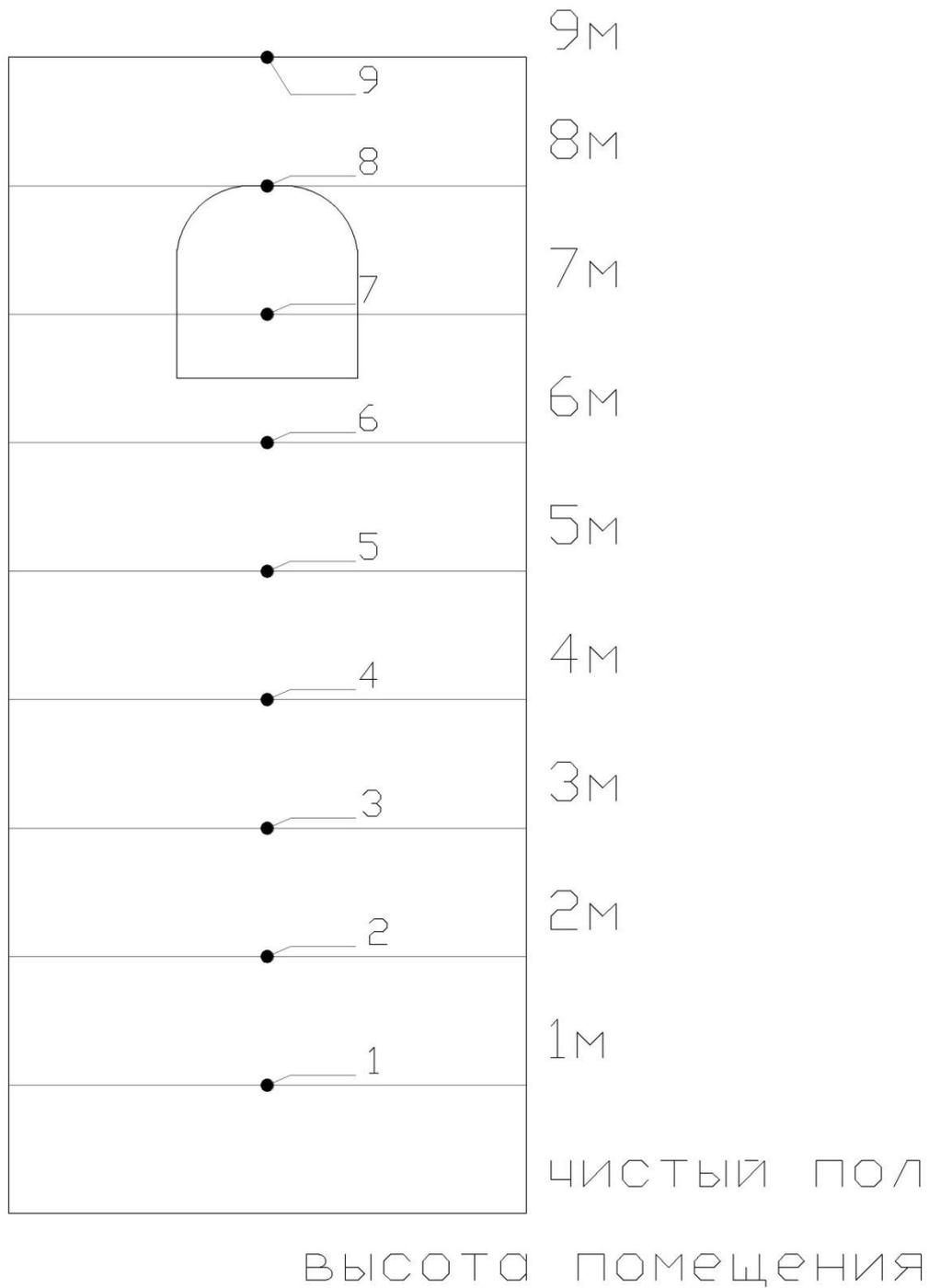


Рис А.6. Расстановка характерных точек исследования на наружной стене молельного зала при наличии одного окна

Таблица А.6.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.6

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	1,5	14,6		
2	2,0	14,4		
3	3,0	14,4		
4	4,0	14,4		
5	5,0	14,4		
6	6,0	14,2		
7	7,0	11,8		
8	8,0	11,8		
9	9,0	13,0		
10	Свод	13,2		

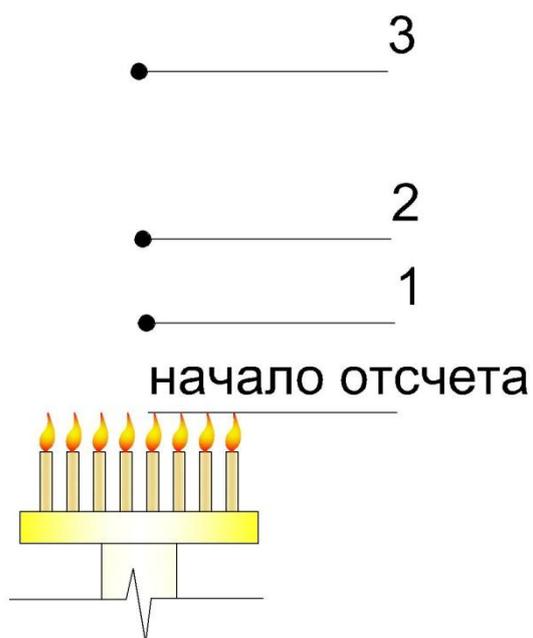


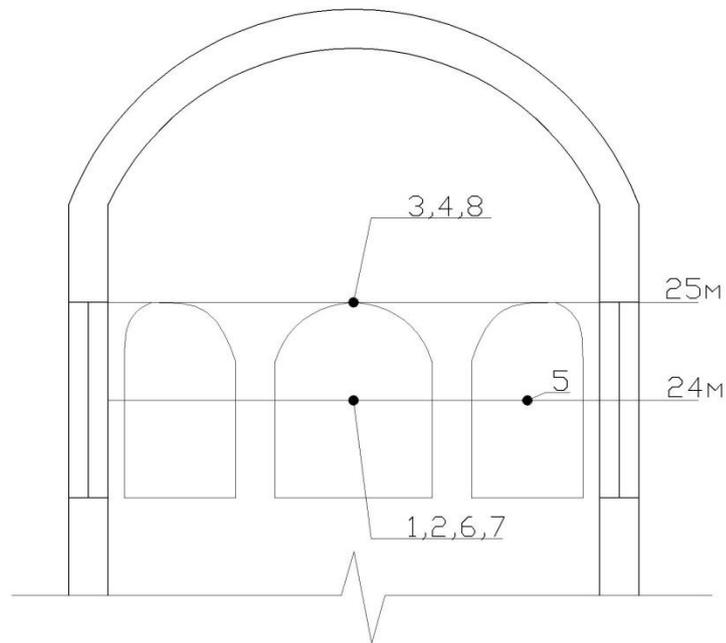
Рис А.7. Расстановка характерных точек исследования над свечами

Таблица А.7

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.7

№ точки	Высота, м	Показания инфракрасного термометра	Показания термоанемометра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	От пламени свечей до 0,2	42-58		
2	0,5	25,0	17,8	0,06-0,14
3	1,0	17,0		

Барабан в разрезе



План барабана на отм +24,00

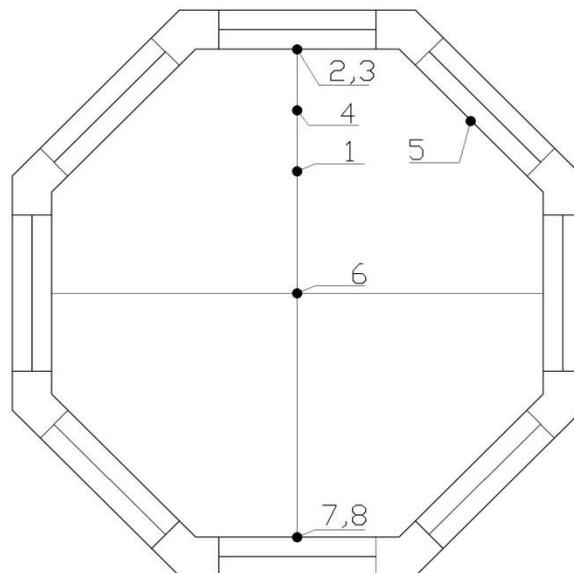


Рис А.8. Расстановка характерных точек исследования в центральном барабане храма над молельным залом

Таблица А.8.

Показания инфракрасного термометра и термоанемометра для рис. А.8

№ точки	Высота, м	Показания инфра- красного термомет- ра	Показания термоанемо- метра	
		Температура, °С	Температура, °С	Скорость, м/с
1	24		19,8	0,16
2	24		18,7	0,19
3	25		18,3	0,14
4	25		18,4	0,14
5	24		17,7	0,32
6	24		17,7	0,27
7	24		17,1	0,16-0,20
8	25		17,3	0,02

**Приложение Б. Значения аэродинамических коэффициентов для  
исследованных православных храмов**

Значения аэродинамических коэффициентов исследованных храмов

Таблица Б.1.

<b>Исследование церкви Жен-Мироносиц</b>								
<b>№ точки</b>	<b>C</b>	<b>C3</b>	<b>3</b>	<b>Ю3</b>	<b>Ю</b>	<b>ЮВ</b>	<b>В</b>	<b>СВ</b>
1	-0,18	-0,30	-0,71	0,41	0,54	-0,15	-0,20	-0,14
2	-0,13	-0,18	-0,64	0,79	0,77	-0,19	-0,18	-0,14
3	-0,18	-0,20	-0,53	0,26	0,92	0,17	-0,18	-0,13
4	-0,13	-0,18	-0,38	0,31	0,97	0,26	-0,19	-0,13
5	-0,18	-0,20	-0,40	0,20	0,97	0,59	-0,14	-0,13
6	-0,18	-0,20	-0,40	0,20	1,00	0,64	-0,18	-0,14
7	-0,13	-0,20	-0,28	0,28	0,92	0,69	-0,19	-0,13
8	-0,20	-0,18	-0,28	-0,23	0,85	0,61	-0,16	-0,15
9	-0,15	-0,18	-0,25	-0,30	0,90	0,87	-0,18	-0,13
10	-0,20	-0,18	-0,31	-0,15	0,90	0,92	-0,20	-0,15
11	-0,20	-0,18	-0,30	-0,18	0,85	0,77	-0,44	-0,18
12	-0,15	-0,18	-0,20	-0,15	0,20	0,82	-0,20	-0,14
13	-0,20	-0,20	-0,13	-0,20	0,85	0,69	-0,31	-0,20
14	-0,36	-0,20	-0,18	-0,18	-0,90	-0,67	1,00	-0,49
15	-0,20	-0,18	-0,15	-0,18	-0,33	-0,44	0,85	-0,79
16	-0,15	-0,18	-0,15	-0,13	-0,26	-0,20	1,00	-0,41
17	-0,08	-0,13	-0,10	-0,15	-0,17	-0,13	0,70	-0,38
18	-0,20	-0,30	-0,13	-0,13	-0,15	-0,10	0,97	-0,18
19	-0,15	-0,18	-0,10	-0,15	-0,13	0,10	0,79	-0,20
20	-1,46	-0,44	-0,15	-0,14	-0,15	-0,13	-2,05	-0,36
21	-1,33	-0,56	-0,46	-0,13	-0,10	-0,23	-1,49	-0,87

22	-0,31	0,18	-0,23	-0,05	-0,06	-0,05	-0,18	0,90
23	-0,26	0,05	-0,23	-0,03	-0,04	-0,05	-0,13	0,74
24	0,44	-0,36	-0,23	-0,05	-0,05	-0,04	-0,31	0,72
25	0,18	-0,23	-0,25	-0,04	-0,03	-0,05	-0,28	0,85
26	0,90	-0,26	-0,25	-0,10	-0,05	-0,05	-0,23	0,51
27	0,56	-0,10	-0,28	-0,06	-0,03	-0,04	-0,18	0,56
28	1,02	-0,31	-0,28	-0,09	-0,03	-0,05	-0,20	0,28
29	0,97	-0,36	-0,38	-0,10	-0,03	-0,05	-0,28	0,20
30	1,02	-0,26	-0,35	-0,08	-0,05	-0,05	-0,31	0,09
31	1,08	-0,20	-0,35	-0,12	-0,03	-0,05	-0,22	-0,10
32	0,97	-0,36	-0,38	-0,10	-0,04	-0,05	-0,19	-0,10
33	1,02	-0,41	-0,40	-0,13	-0,03	-0,04	-0,14	-0,09
34	0,79	0,18	-0,40	-0,09	-0,04	-0,05	-0,23	-0,31
35	0,59	-0,13	-0,40	-0,12	-0,03	-0,05	-0,13	-0,55
36	-0,18	0,82	0,65	0,04	-0,06	-0,08	-0,05	-0,15
37	-0,41	0,59	0,85	0,10	-0,05	-0,06	-0,05	-0,20
38	-0,15	0,82	0,98	-0,33	-0,06	-0,08	-0,04	-0,15
39	-0,18	-0,36	0,71	0,59	-0,12	-0,10	-0,05	-0,13

**Исследование Крестовоздвиженского собора**

<b>№ точки</b>	<b>С</b>	<b>СЗ</b>	<b>З</b>	<b>ЮЗ</b>	<b>Ю</b>	<b>ЮВ</b>	<b>В</b>	<b>СВ</b>
1	0,26	1,00	-0,10	-0,13	-0,05	-0,05	-0,18	-0,10
2	-0,15	-0,15	-0,10	1,00	0,26	-0,03	-0,13	-0,13
3	-0,18	-0,18	-0,15	0,87	0,56	-0,03	-0,14	-0,13
4	-0,18	-0,18	-0,15	0,97	0,26	-0,03	-0,13	-0,13
5	-0,20	-0,13	0,20	1,00	0,10	-0,03	-0,13	-0,13
6	-0,20	-0,13	-0,15	-0,20	0,10	1,00	0,23	-0,15
7	-0,15	-0,15	-0,18	-0,15	0,26	1,00	-0,10	-0,16
8	-0,13	-0,15	-0,20	-0,13	0,56	1,00	-0,18	-0,18
9	-0,15	-0,15	-0,18	-0,20	-0,26	1,00	0,28	-0,15

10	-0,13	-0,13	-0,15	-0,18	-0,10	1,00	0,33	-0,05
11	-0,30	-0,18	-0,15	-0,15	-0,18	-0,30	1,00	-0,26
12	-0,53	-0,18	-0,13	-0,13	-0,15	-0,36	1,00	-0,18
13	-0,28	-0,15	-0,15	-0,15	-0,05	-0,18	0,33	1,00
14	-0,28	-0,18	-0,15	-0,15	-0,05	-0,20	0,61	1,00
15	0,26	1,00	-0,15	-0,13	-0,05	-0,14	-0,23	-0,10
16	0,56	1,00	-0,15	-0,13	-0,05	-0,15	-0,20	-0,13
17	-0,28	-0,28	-0,20	-0,15	-0,28	-0,23	-0,15	-0,10
18	-0,20	-0,43	0,23	0,30	0,28	-0,41	-0,18	-0,18
19	-0,25	-0,20	-0,41	-0,25	-0,20	-0,20	-0,18	-0,15
20	-0,18	-0,28	-0,23	-0,33	0,20	0,48	0,20	-0,26
21	-0,20	-0,20	-0,18	-0,18	-0,33	-0,30	-0,20	-0,20
22	0,20	-0,41	-0,20	-0,18	-0,23	-0,30	0,20	0,33
23	-0,18	-0,15	-0,28	-0,18	-0,16	-0,18	-0,23	-0,23
24	0,25	0,41	0,28	-0,33	-0,20	-0,18	-0,18	-0,18

**Исследование Рождественской церкви**

№ точки	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ
1	0,93	0,36	0,23	-0,18	-0,18	-0,15	-0,18	-0,31
2	1,00	0,31	0,28	-0,18	-0,18	-0,20	-0,15	-0,31
3	0,95	0,13	0,25	-0,20	-0,15	-0,20	-0,15	-0,08
4	0,84	0,05	0,24	-0,15	-0,15	-0,23	-0,25	0,05
5	0,70	0,03	0,18	0,18	0,15	-0,25	-0,26	0,41
6	0,56	-0,23	-0,18	-0,18	-0,18	-0,25	-0,38	0,38
7	0,41	-0,22	-0,18	-0,18	-0,20	-0,23	-0,51	0,33
8	-0,56	-0,13	-0,18	-0,18	-0,23	-1,36	-1,95	0,87
9	-0,23	-0,13	-0,15	-0,15	-0,87	-1,05	0,92	-0,36
10	-0,13	-0,13	-0,13	-0,15	-0,64	0,61	-0,20	-1,66
11	-0,13	-0,14	-0,13	-0,13	0,69	-0,15	-0,59	-0,36
12	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	0,46	-0,15	-0,15	-0,23

13	-0,13	-0,20	-0,13	-0,03	0,69	-0,26	-0,33	-0,28
14	-0,13	-0,20	-0,13	-0,08	0,82	0,28	0,15	-0,18
15	-0,15	-0,20	-0,14	-0,13	0,51	0,13	0,18	-0,15
16	-0,13	-0,20	-0,14	-0,15	0,38	0,33	0,31	-0,15
17	-0,13	-0,20	-0,14	-0,10	0,49	0,59	0,33	-0,20
18	-0,30	0,54	1,00	0,46	-0,03	-0,03	-0,13	-0,15
19	-0,33	0,85	0,92	-0,10	-0,03	-0,03	-0,13	-0,23
20	-0,33	0,97	0,61	-0,23	-0,03	-0,08	-0,13	-0,23
21	-0,30	1,05	-0,20	-0,49	-0,03	-0,08	-0,13	-0,20
22	-0,20	-0,13	-0,08	-0,08	-0,15	-0,33	0,03	0,49
23	-0,20	-0,13	-0,13	-0,15	-0,20	-0,31	0,82	0,20
24	-0,10	-0,13	-0,19	-0,18	-0,26	0,59	-0,15	-0,20
25	-0,13	0,13	0,08	0,15	0,08	-0,03	-0,03	0,15
26	-0,25	-0,13	0,08	-0,13	-0,36	-0,74	-0,31	-0,87
27	-0,15	-0,13	-0,18	-0,10	-0,08	0,05	-0,03	-0,18
28	-0,20	-0,14	-0,10	-0,44	-0,26	-0,31	-0,36	-0,31
29	-0,28	-0,14	-0,56	0,13	0,28	-0,18	-0,26	-0,26
30	-0,15	0,15	0,13	0,13	0,15	0,15	0,13	0,15
31	0,18	0,13	0,13	0,08	0,10	0,18	0,13	0,13
32	-0,41	-0,13	0,13	-0,20	-0,10	-0,26	-0,38	-0,69
33	-0,23	-0,13	-0,23	-0,10	-0,20	-0,41	0,10	0,05
34	-0,20	-0,13	-0,18	-0,10	-0,08	0,23	-0,08	-0,20
35	-0,23	-0,13	-0,20	-0,08	-0,08	-0,28	-0,15	-0,15
36	0,38	-0,13	-0,18	-0,15	-0,10	-0,18	-0,23	-0,44
37	-0,38	-0,13	-0,20	-0,10	-0,10	-0,13	0,26	0,41
38	-0,20	-0,13	-0,18	0,15	-0,10	-0,10	-0,15	-0,31
39	-0,56	-0,18	0,18	0,15	-0,23	-0,13	-0,13	-0,15
40	0,31	-0,13	0,15	-0,10	-0,13	-0,15	-0,13	-0,23
41	-0,20	-0,15	-0,08	-0,13	0,28	-0,18	-0,15	-0,18

42	-0,13	-0,14	-0,10	-0,18	-0,28	-0,20	-0,26	-0,23
43	-0,18	-0,13	-0,18	0,20	0,36	-0,20	-0,18	-0,18
44	-0,08	-0,13	0,36	-0,13	-0,20	0,31	0,46	0,18
<b>Исследование Спасо-Преображенского собора</b>								
№ точки	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ
1	0,67	-0,25	-0,13	-0,13	0,03	-0,13	-0,26	0,95
2	0,64	-0,24	-0,13	0,13	-0,03	-0,15	-0,23	1,00
3	0,67	0,95	-0,26	-0,13	-0,03	0,13	-0,13	-0,28
4	0,64	0,87	-0,23	-0,13	-0,03	0,13	-0,13	-0,23
5	-0,08	1,00	0,13	-0,13	-0,03	-0,13	-0,13	-0,15
6	-0,10	0,87	0,85	-0,13	0,05	0,13	-0,13	-0,25
7	-0,30	0,95	-0,61	-0,13	-0,03	-0,13	-0,13	0,23
8	-0,18	-0,14	-0,67	0,79	-0,20	-0,19	0,13	-0,13
9	-0,03	-0,13	0,85	0,85	-0,23	-0,13	0,13	-0,13
10	-0,03	-0,13	-0,23	0,85	0,64	-0,13	-0,13	-0,13
11	-0,03	-0,13	-0,26	0,79	0,67	-0,13	-0,13	-0,13
12	-0,03	-0,13	-0,13	-0,13	0,67	1,00	-0,23	-0,29
13	-0,03	-0,13	-0,13	0,13	0,64	0,95	-0,26	-0,29
14	-0,13	-0,13	-0,13	-0,20	-0,33	0,95	0,85	-0,26
15	-0,13	-0,13	-0,13	-0,20	-0,33	1,00	0,61	-0,35
16	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,30	0,67	0,51	-0,31
17	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,32	-0,61	0,59	-0,95
18	-0,24	-0,13	-0,13	-0,03	-0,29	-1,38	1,13	-1,38
19	-0,23	-0,13	-0,13	-0,03	-0,16	-0,61	0,49	-0,61
20	-0,24	-0,13	-0,03	-0,03	-0,14	-1,18	0,31	0,67
21	-0,29	-0,13	-0,03	-0,03	-0,14	-0,18	0,85	1,00
22	-0,20	-0,13	0,03	0,03	-0,23	-0,06	-0,51	0,95
23	-0,10	-0,38	-0,18	-0,35	-0,24	-0,23	-0,51	-0,48
24	-0,18	-0,38	-0,15	-0,53	-0,33	-0,26	-0,33	-0,58

25	-0,23	-0,63	-0,30	-0,28	-0,48	-0,34	-0,23	-0,30
26	-0,10	-0,40	-0,28	-0,28	-0,51	-0,69	-0,33	0,23
27	-0,03	-0,56	-0,38	-0,41	-0,40	-0,51	-0,69	-0,33
28	-0,08	-0,23	-0,23	-0,20	-0,51	-0,40	-0,43	-0,51
29	-0,18	-0,05	-0,23	-0,10	-0,51	-0,61	-0,43	-0,40
30	-0,20	-0,10	-0,26	-0,25	-0,30	-0,56	-0,43	-0,43
31	-0,13	-0,23	-0,25	-0,23	-0,28	-0,43	0,67	0,67
32	-0,49	-0,09	-0,30	-0,23	-0,25	-0,40	-0,49	-0,49
33	0,20	-0,46	-0,46	-0,38	0,24	-0,25	-0,69	-0,69
34	-0,33	-0,82	-0,56	-0,33	-0,26	-0,23	-0,15	-0,25
35	0,18	-0,15	0,61	-0,33	-0,28	-0,23	-0,19	-0,29
36	0,41	0,41	0,03	-0,13	-0,16	-0,23	-0,25	-0,23
37	-0,74	0,20	0,18	-0,56	-0,25	-0,24	-0,24	-0,43
38	-0,56	0,33	-0,13	-0,61	-0,92	-0,23	0,23	-0,25
39	-0,06	-1,36	0,13	0,20	-1,02	-0,41	-0,24	-0,23
40	-0,03	-0,46	0,18	0,20	0,51	-0,23	-0,26	0,23
41	-0,26	-0,23	0,28	0,41	0,19	-0,20	-0,20	0,23
42	-0,28	-0,23	-0,64	-0,20	-0,67	-0,74	-0,23	0,24
43	-0,23	-0,38	-0,51	-0,51	0,20	-0,95	-0,87	-0,25
44	-0,25	-0,26	0,30	-0,44	-0,95	-0,13	-0,87	-0,66
45	-0,23	-0,23	0,25	-0,13	-0,13	0,31	0,85	0,28
46	-0,16	-0,23	-0,26	-0,28	0,51	0,26	0,16	0,18
47	-0,20	-0,23	-0,23	-0,48	-0,82	0,08	-0,69	-1,02
48	-0,31	-0,23	-0,23	-0,23	-0,56	-1,0	0,51	-0,46
49	-0,51	-0,24	-0,23	0,23	-0,25	-0,61	0,82	0,56
50	0,56	-0,28	-0,23	-0,23	-0,16	-0,15	0,13	0,36
51	-0,13	-0,13	0,13	1,00	-0,13	-0,18	0,03	-0,13

Примечание: данные получены при скорости воздуха  $v_b=11,2$  м/с и плотности  $\rho_b=1,21$  кг/м<sup>3</sup>

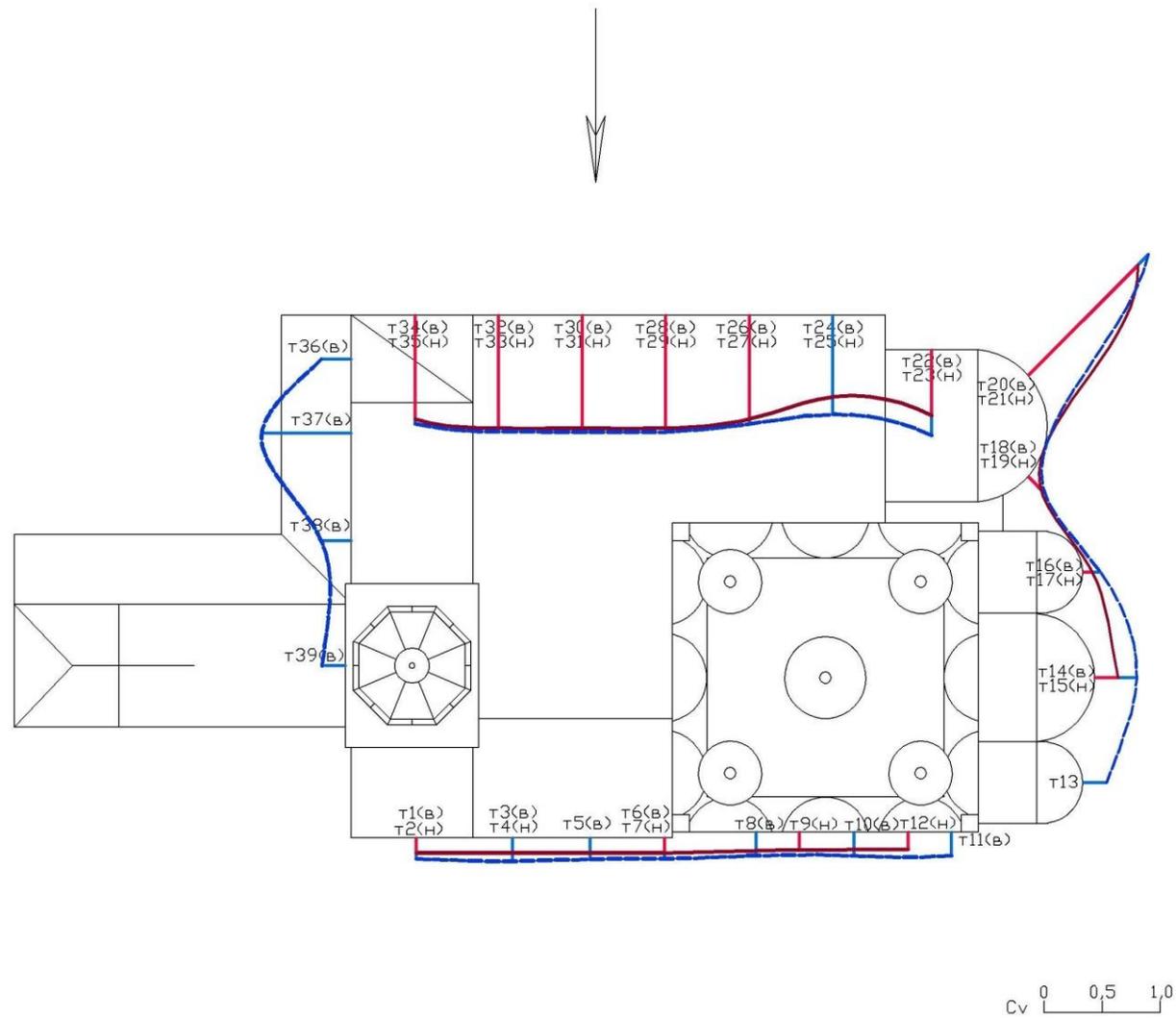


Рис Б.1 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при северном направлении ветра

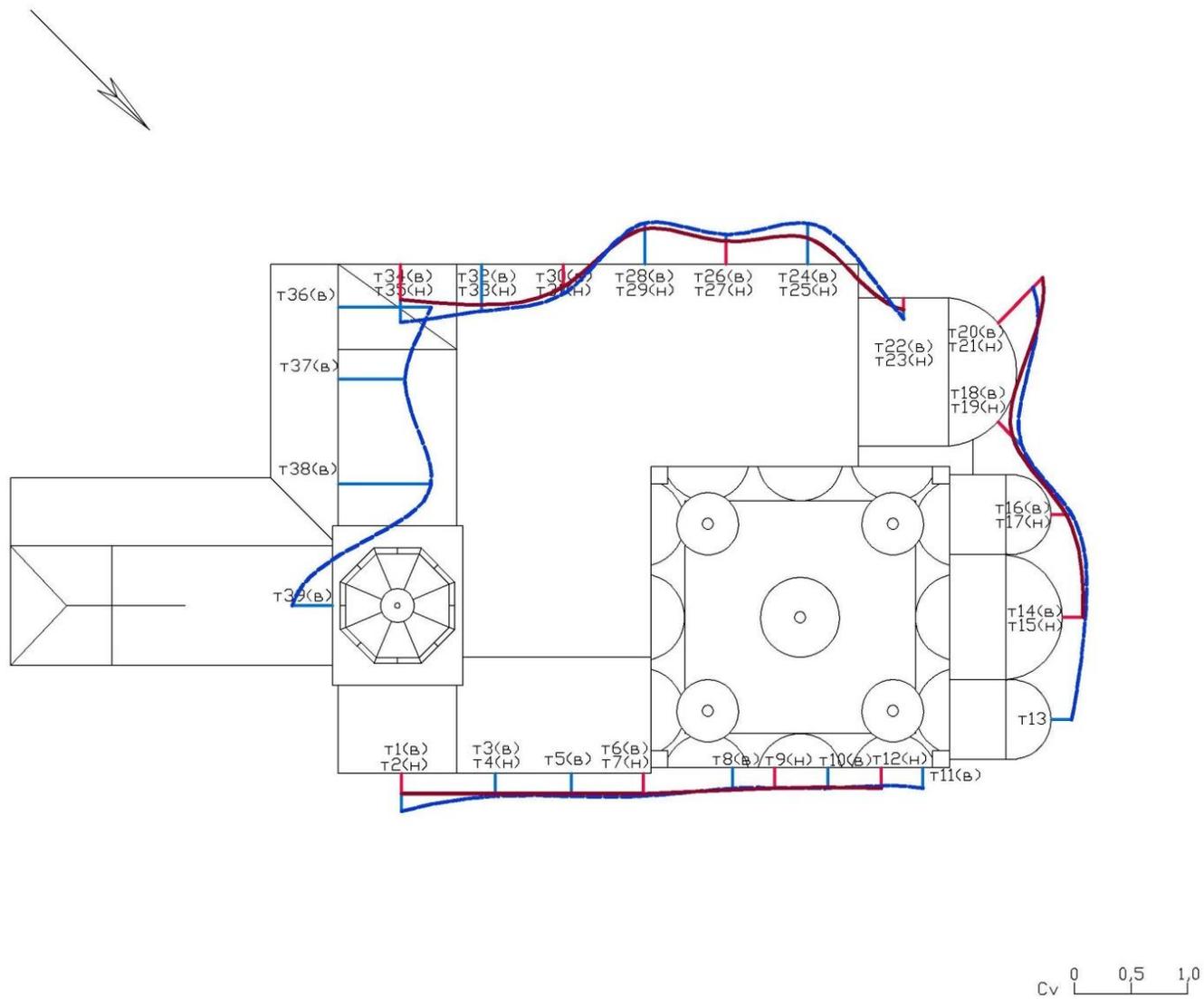


Рис Б.2 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-западном направлении ветра

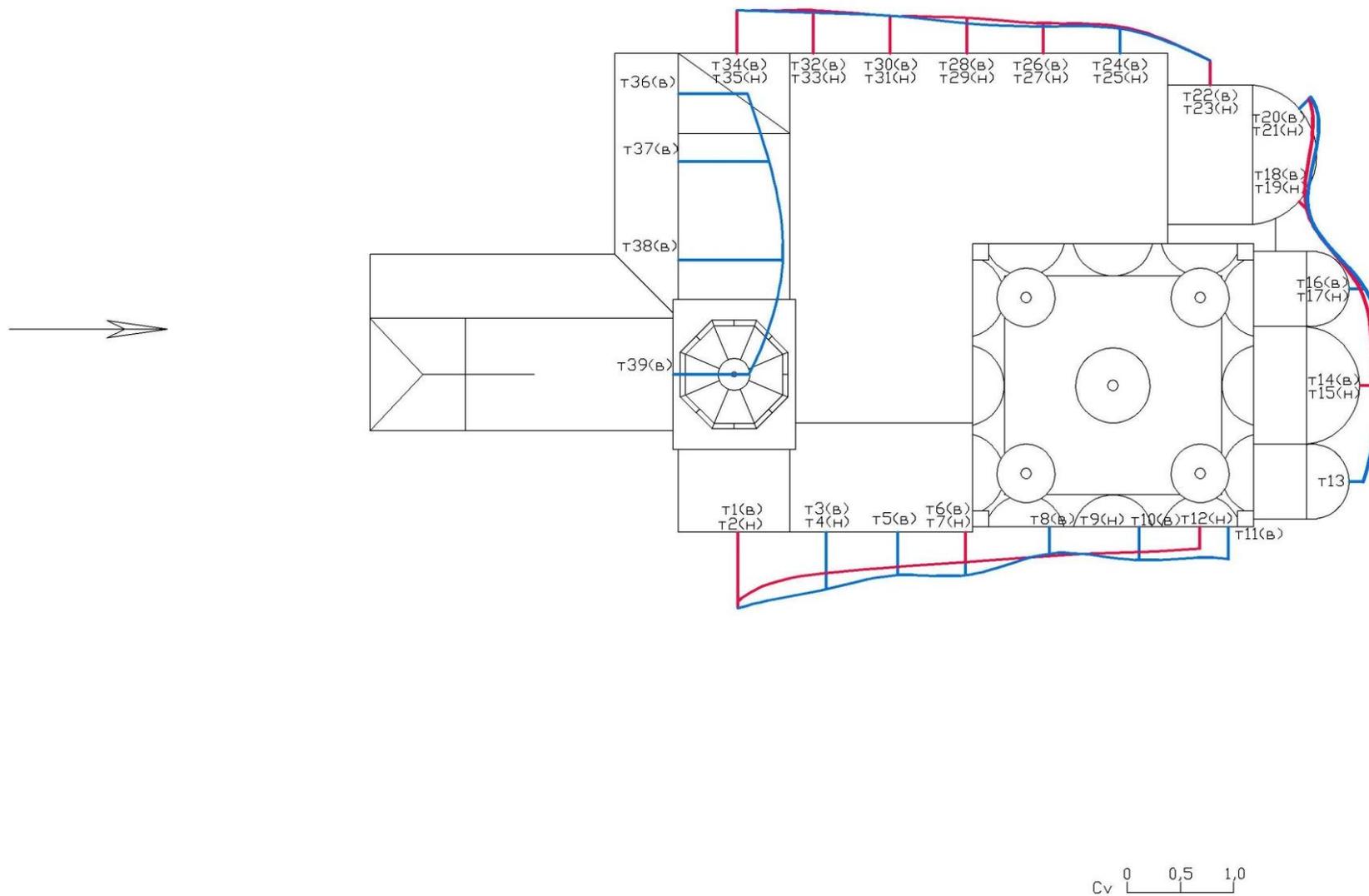


Рис Б.3 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при западном направлении ветра

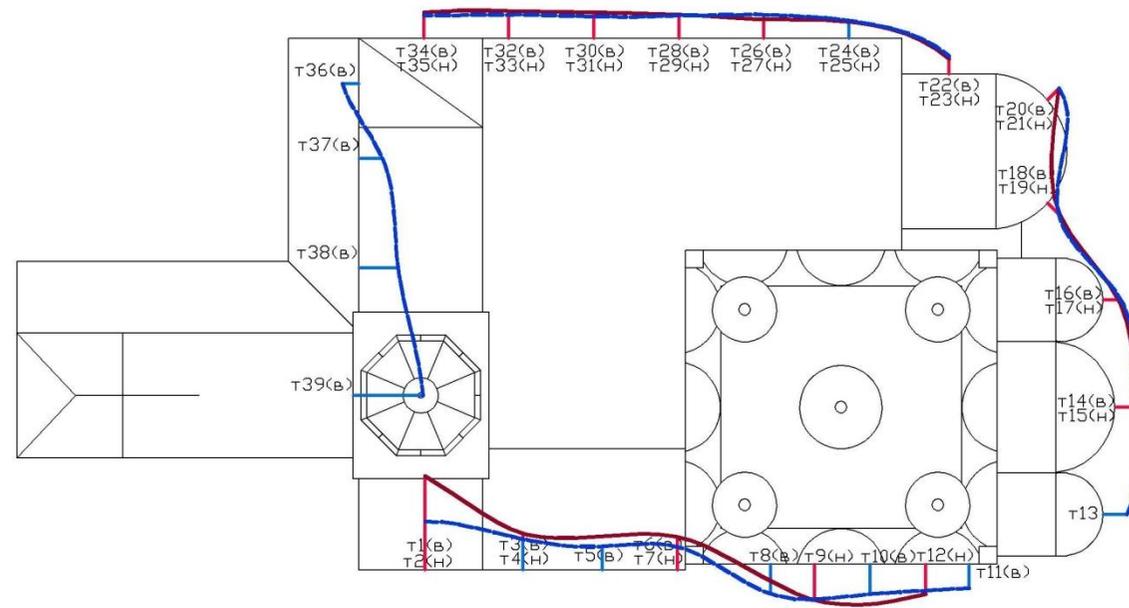


Рис Б.4 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-западном направлении ветра

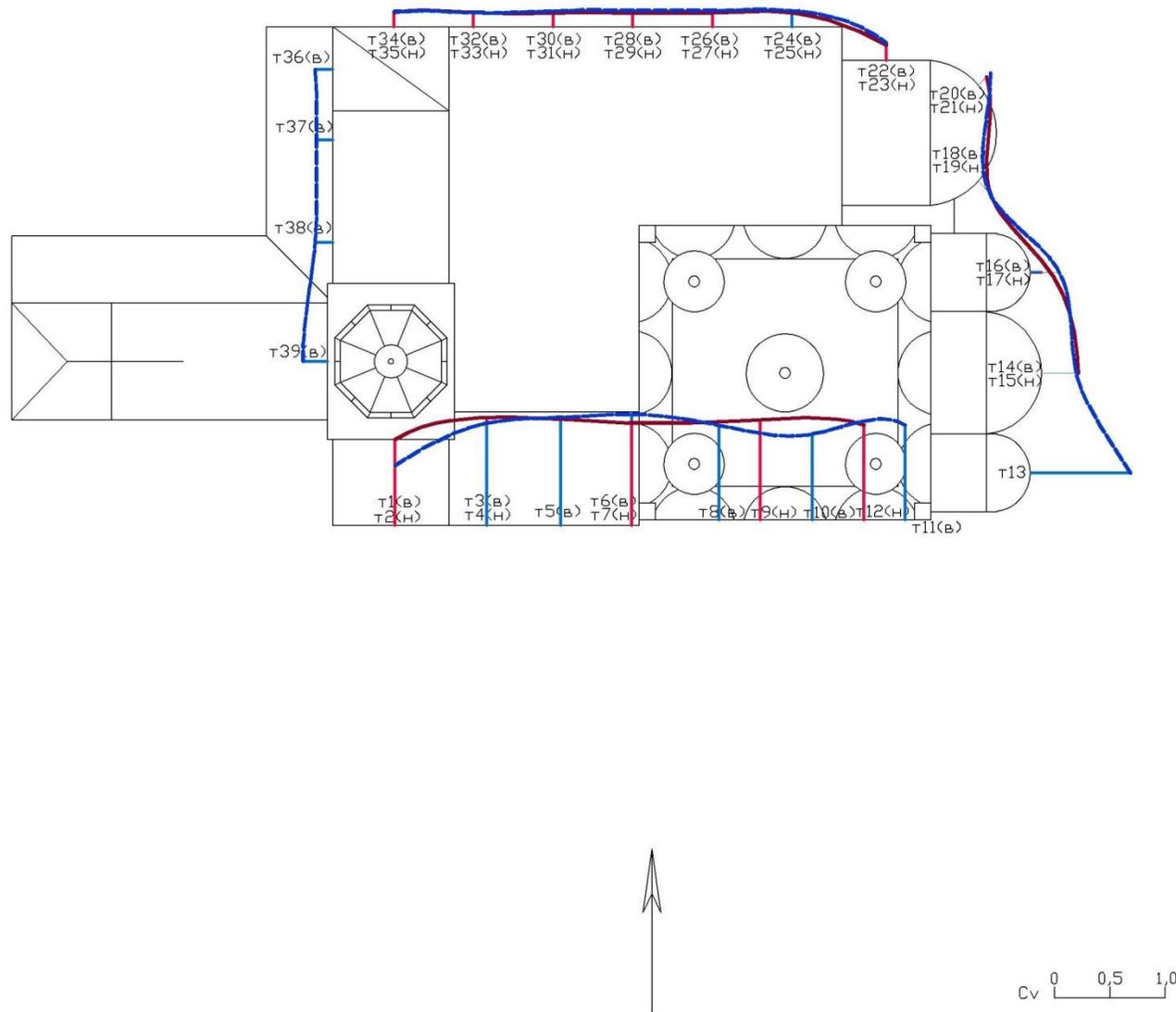


Рис Б.5 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при южном направлении ветра

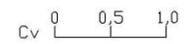
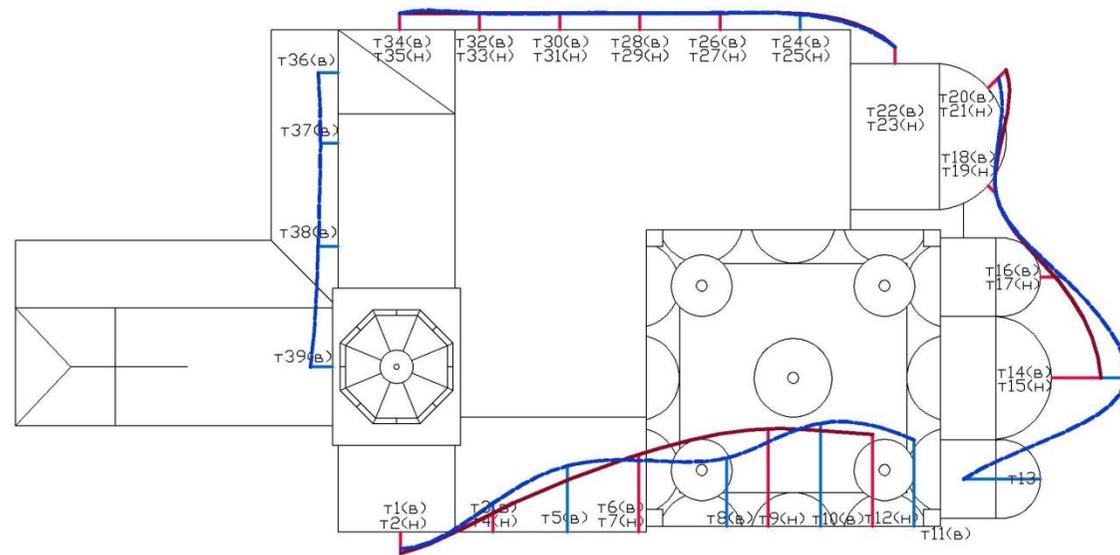


Рис Б.6 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-восточном направлении ветра

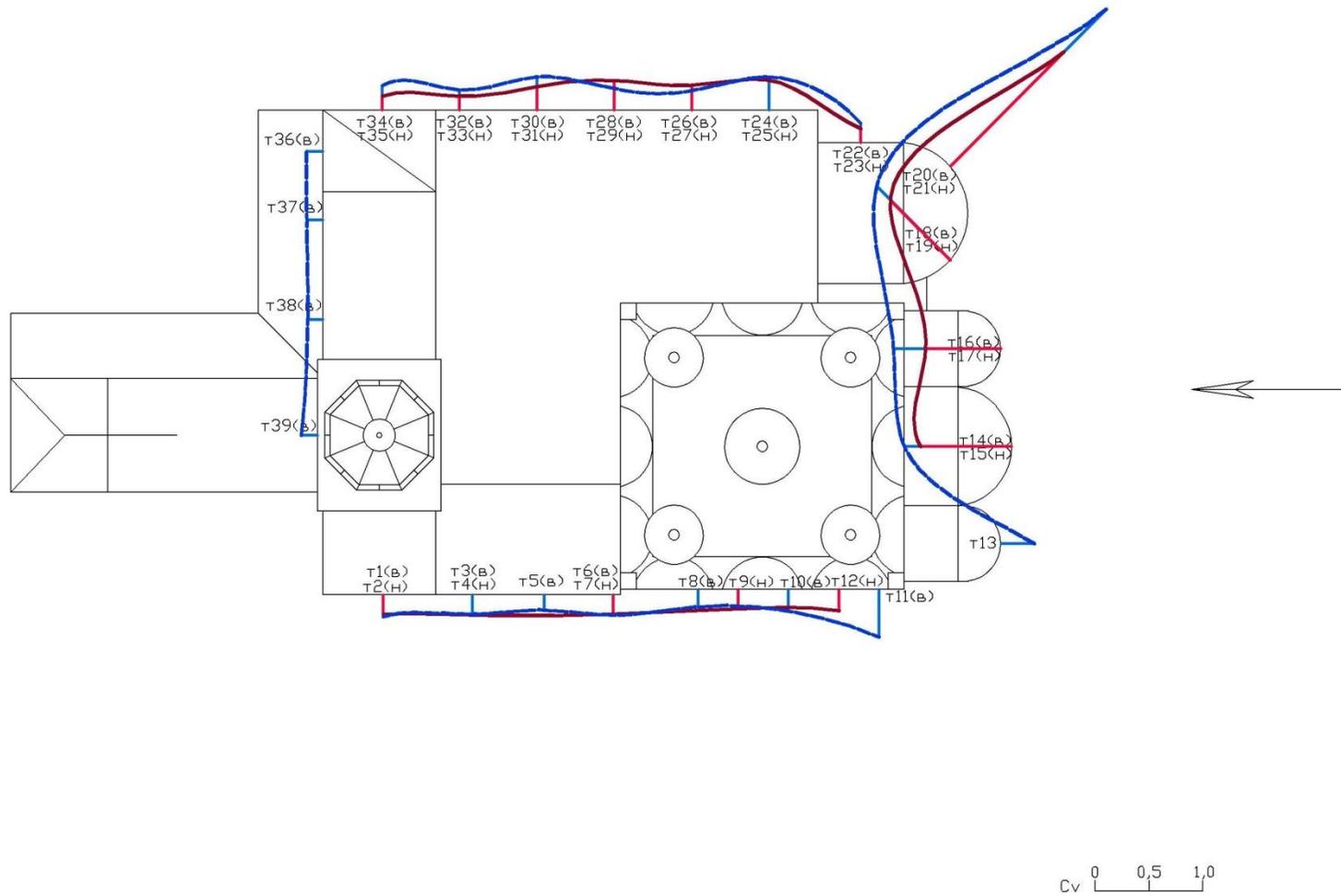


Рис Б.7 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при восточном направлении ветра

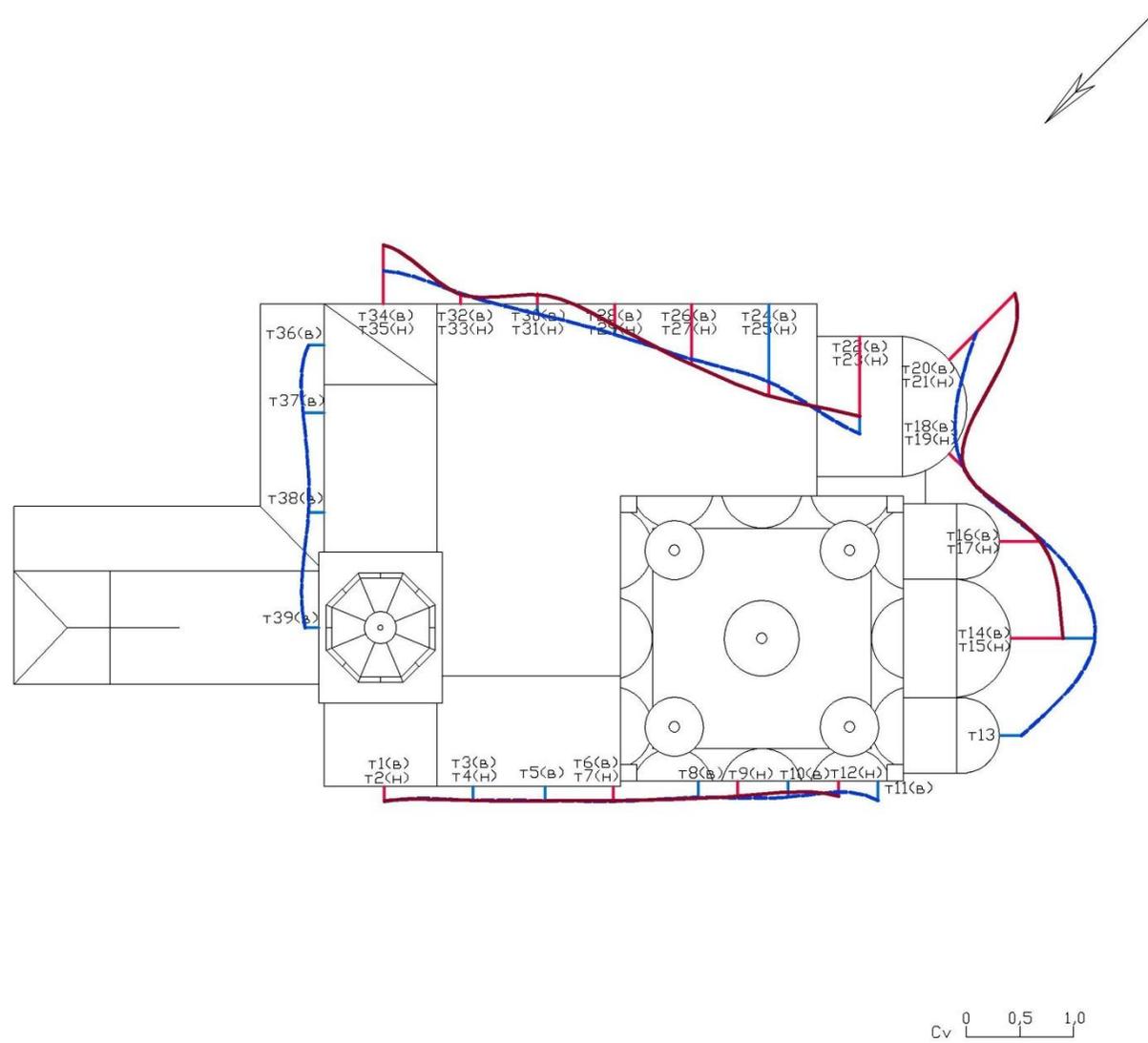


Рис Б.8 Церковь Жен-Мироносиц. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-восточном направлении ветра

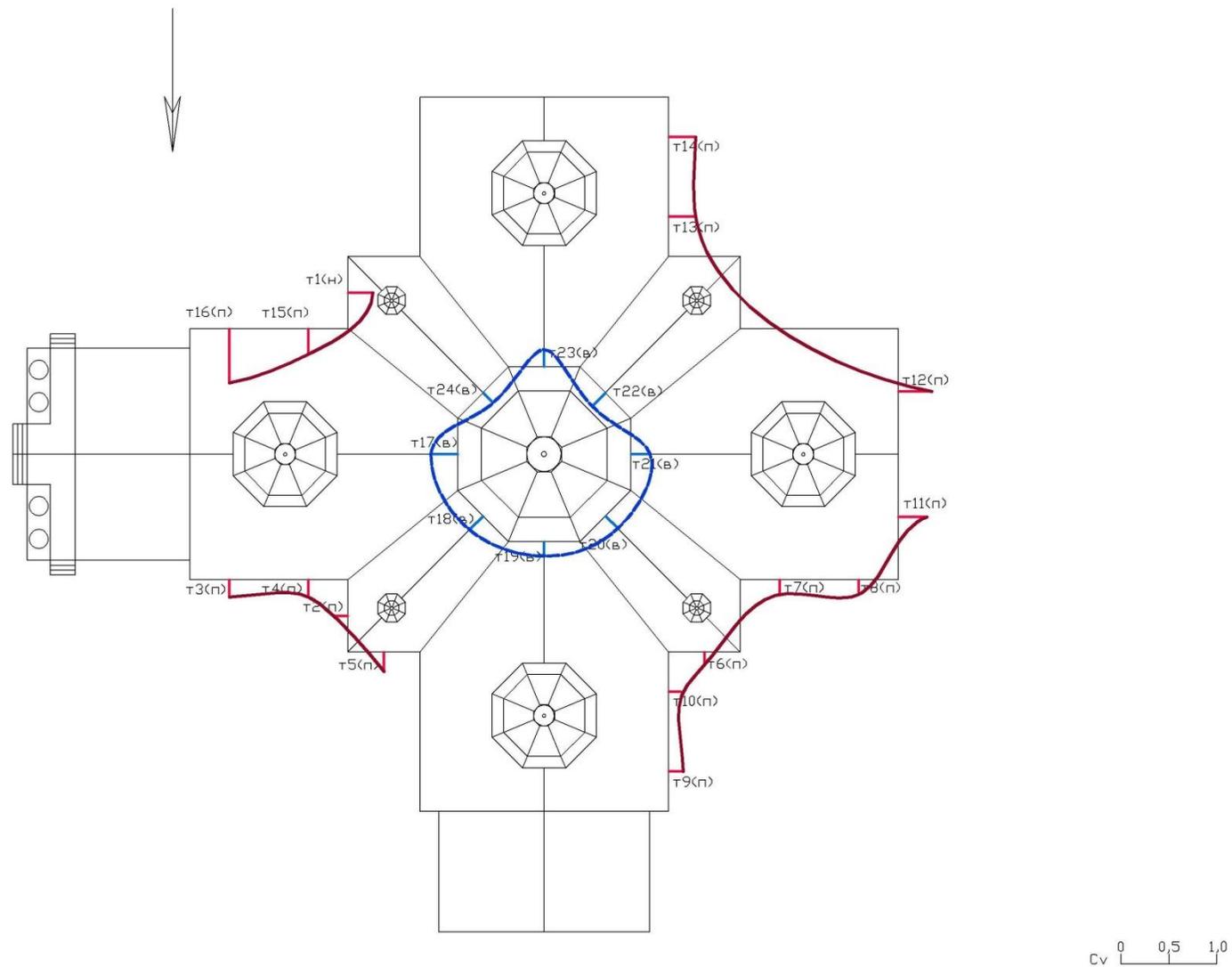


Рис Б.9 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при северном направлении ветра

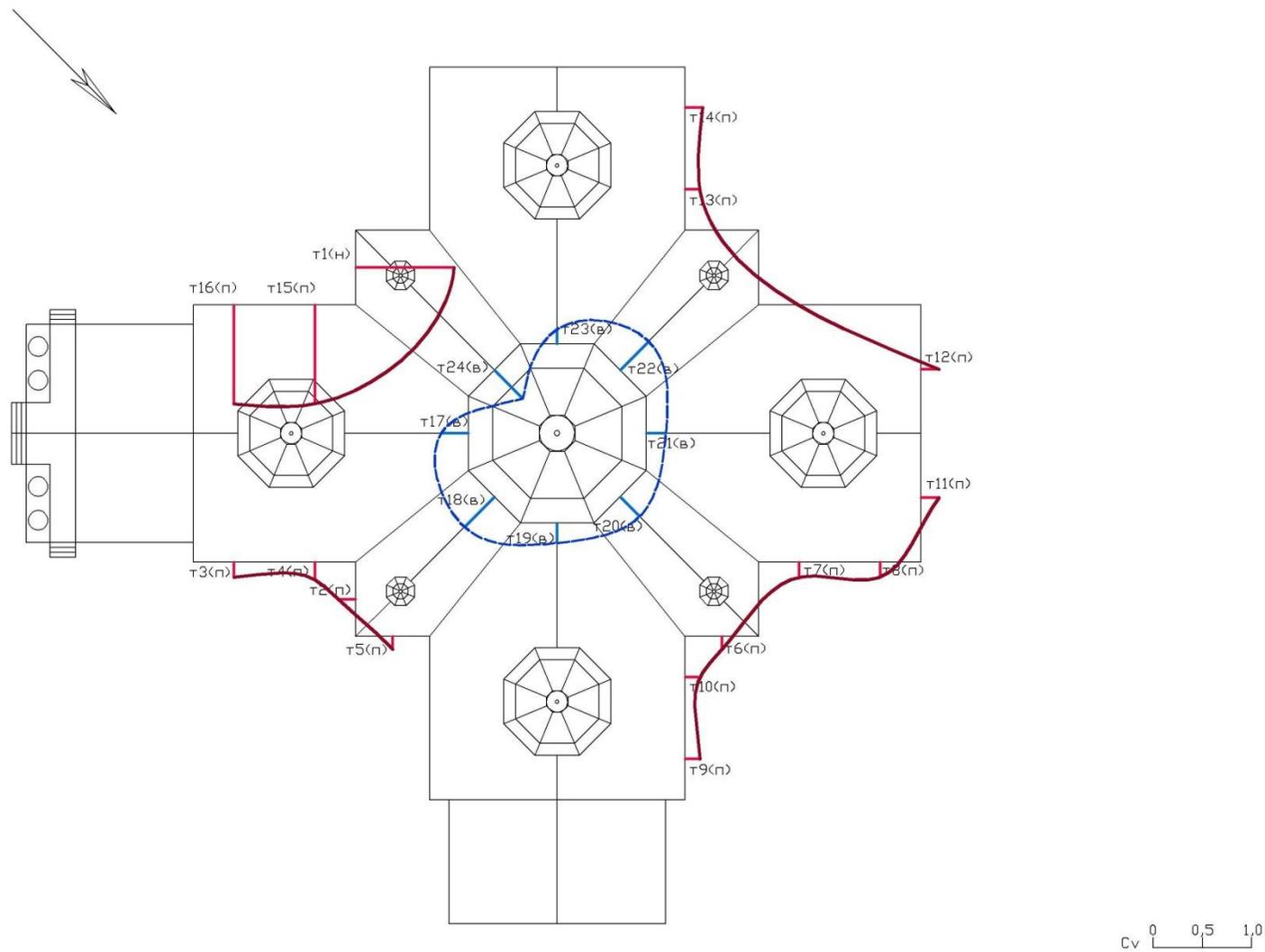


Рис Б.10 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-западном направлении ветра

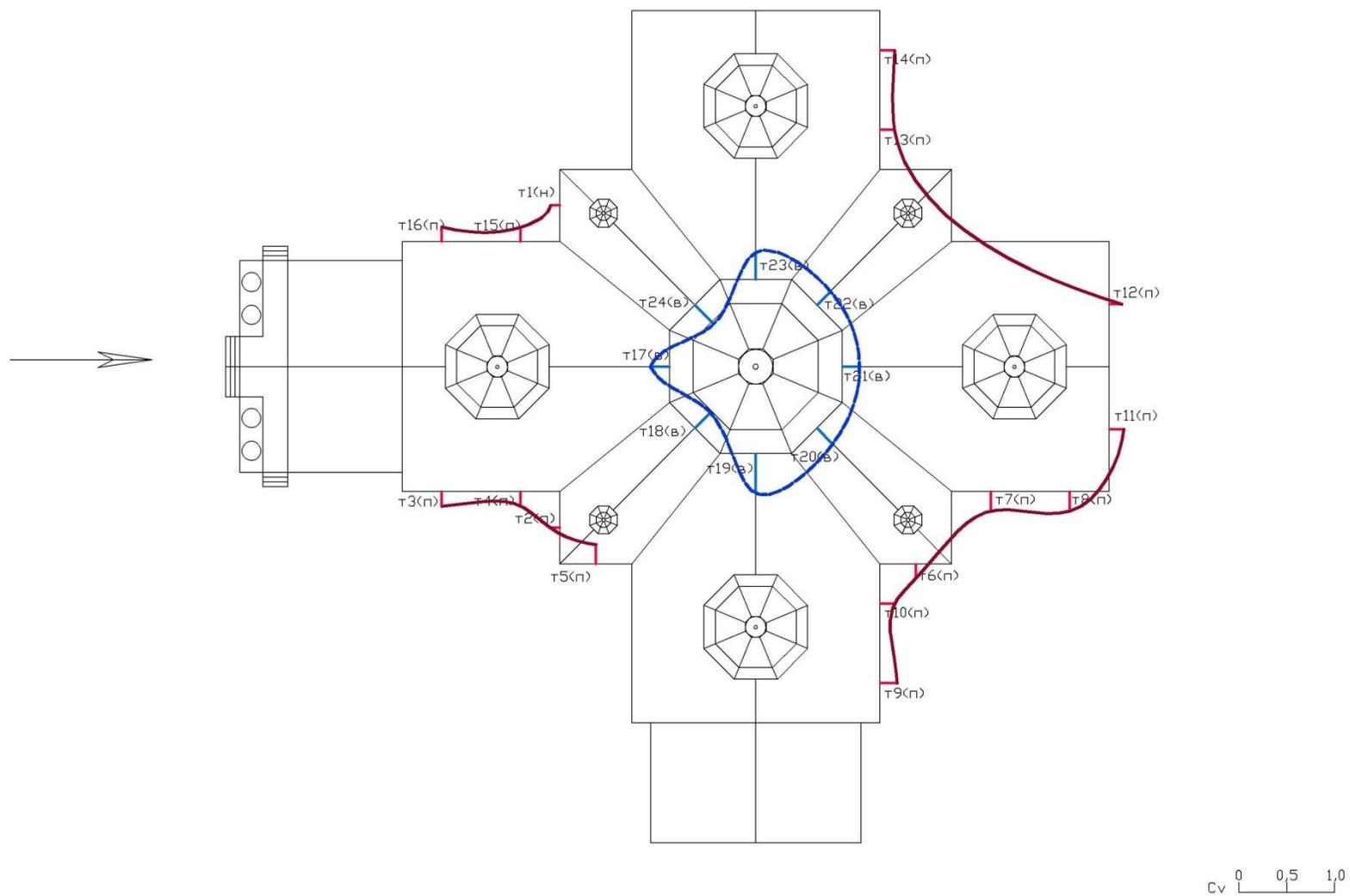


Рис Б.11 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при западном направлении ветра

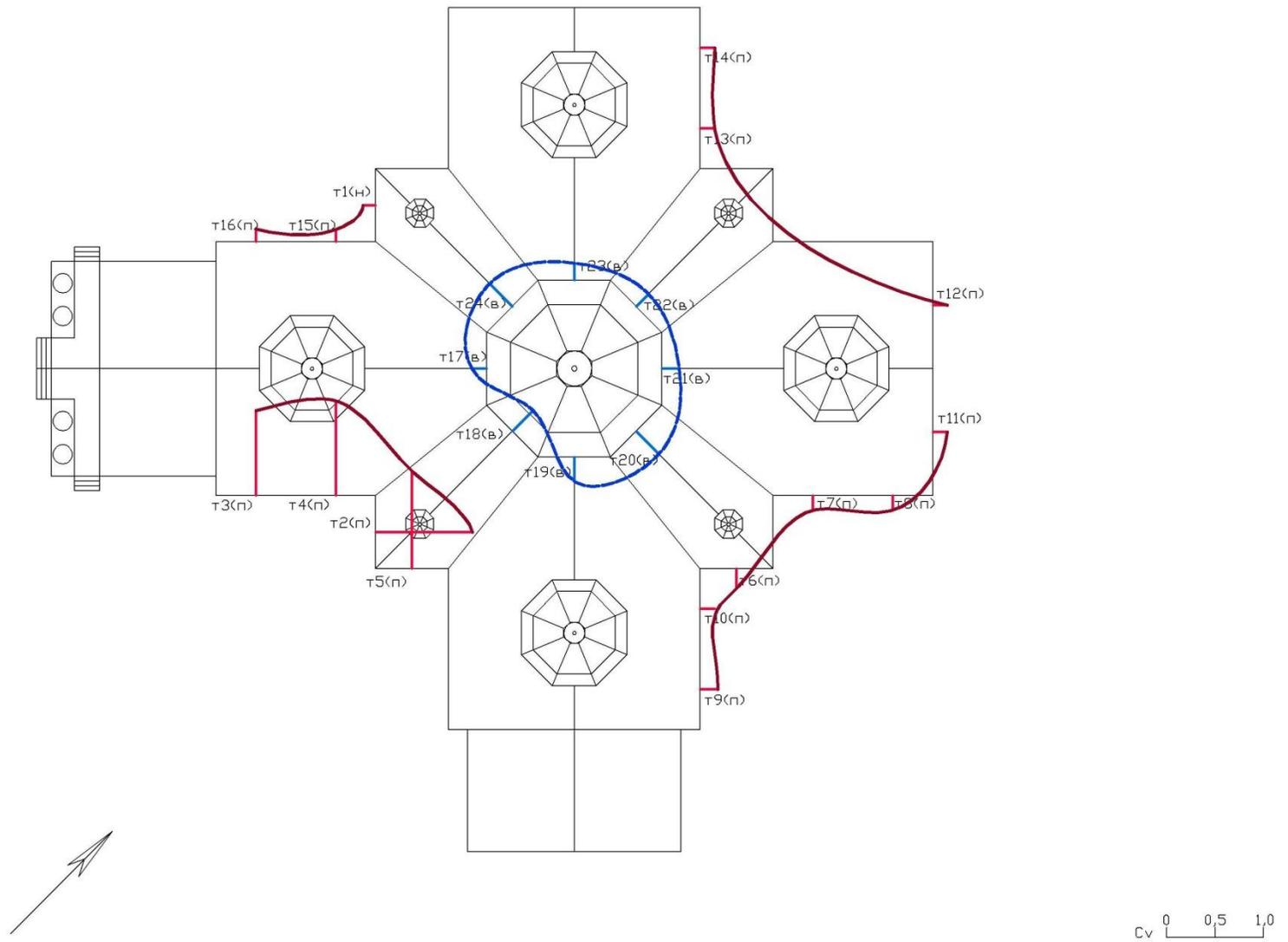


Рис Б.12 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-западном направлении ветра

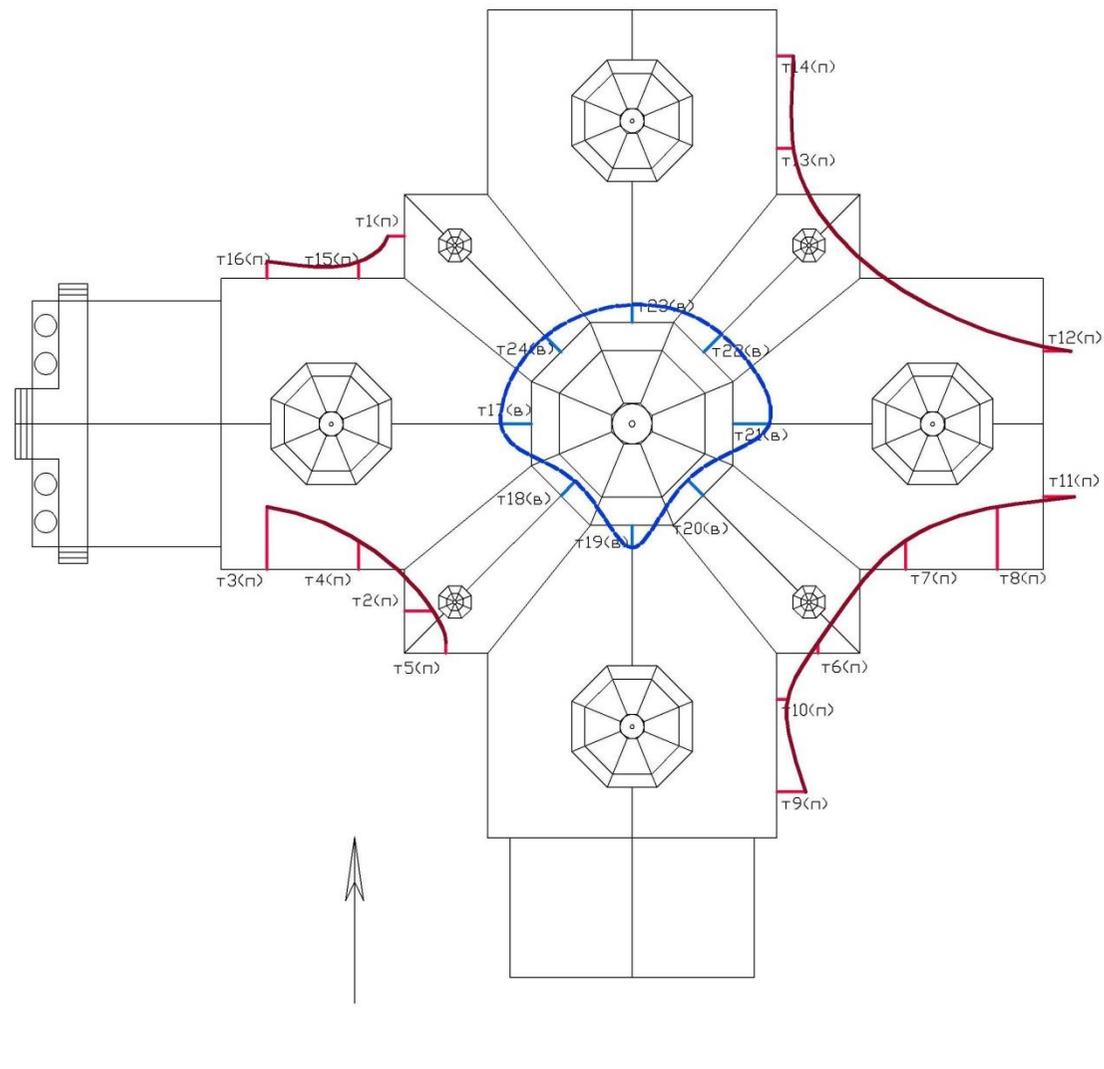
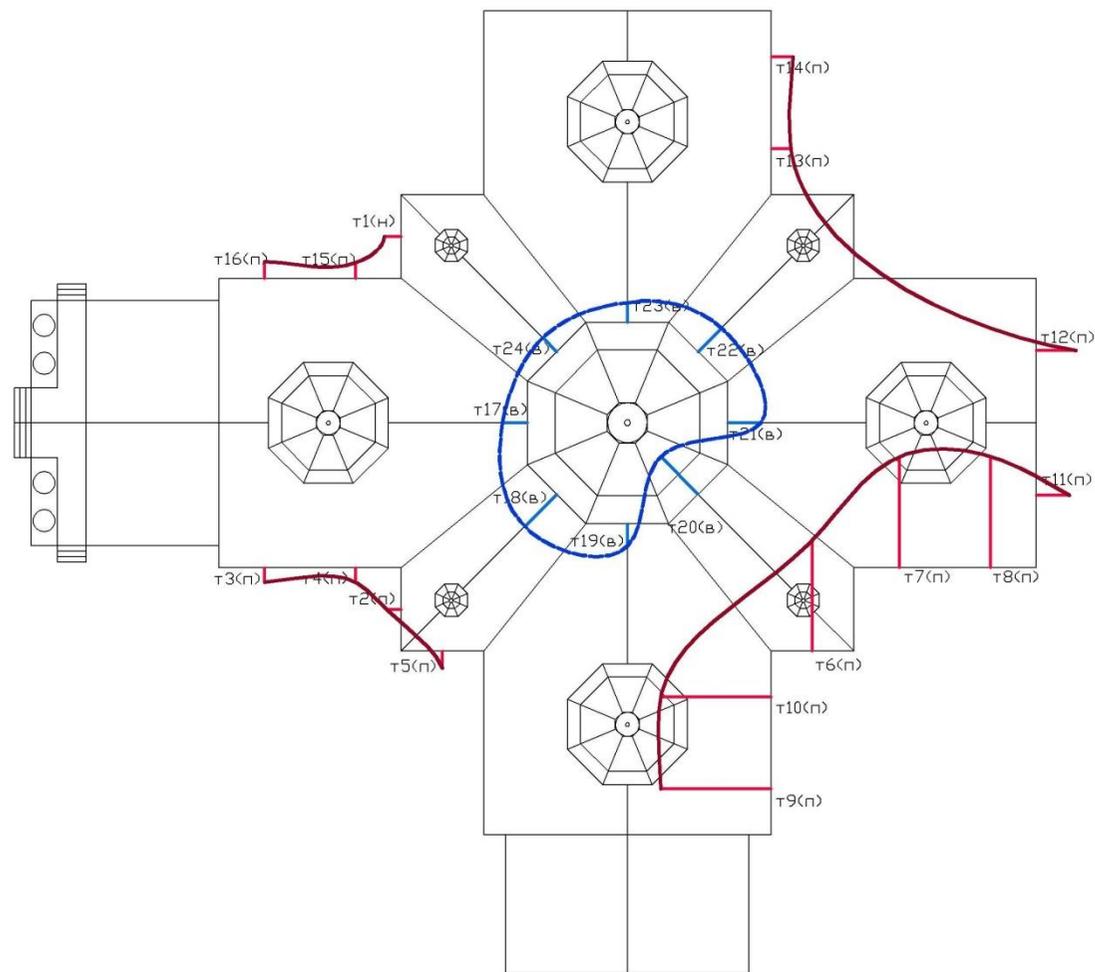


Рис Б.13 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при южном направлении ветра



0 0,5 1,0  
св

Рис Б.14 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-восточном направлении ветра

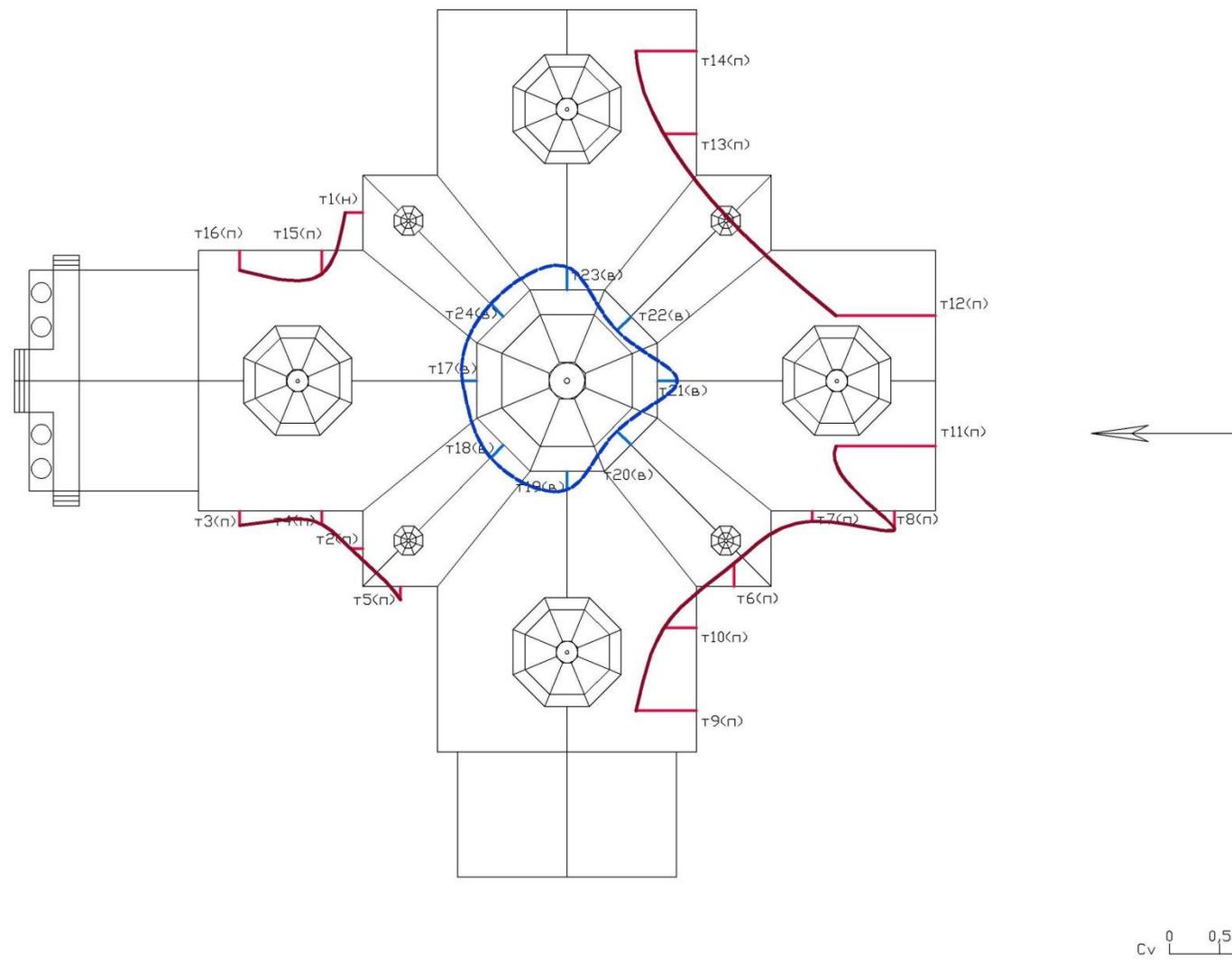


Рис Б.15 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при восточном направлении ветра

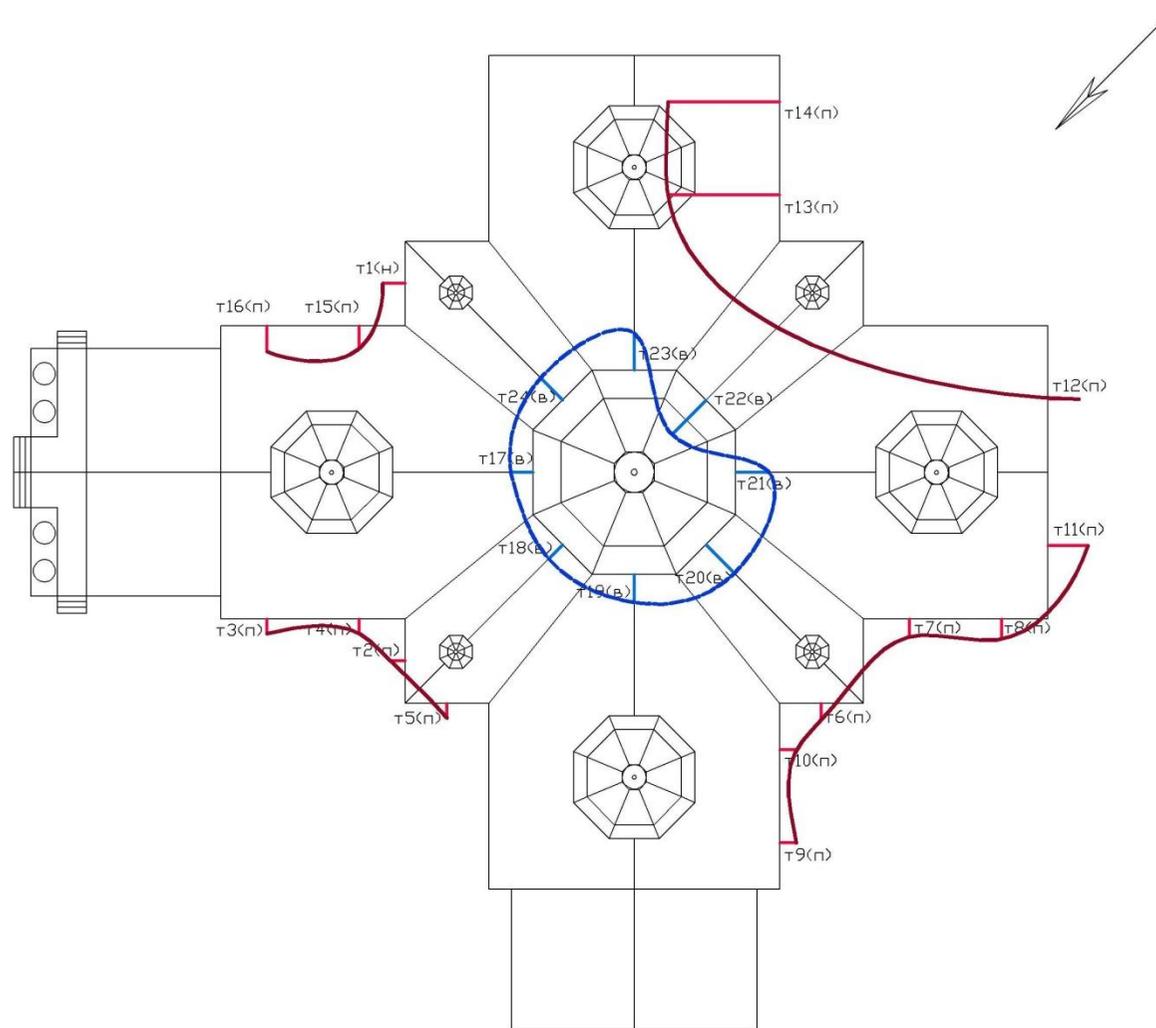


Рис Б.16 Крестовоздвижеский храм. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-восточном направлении ветра

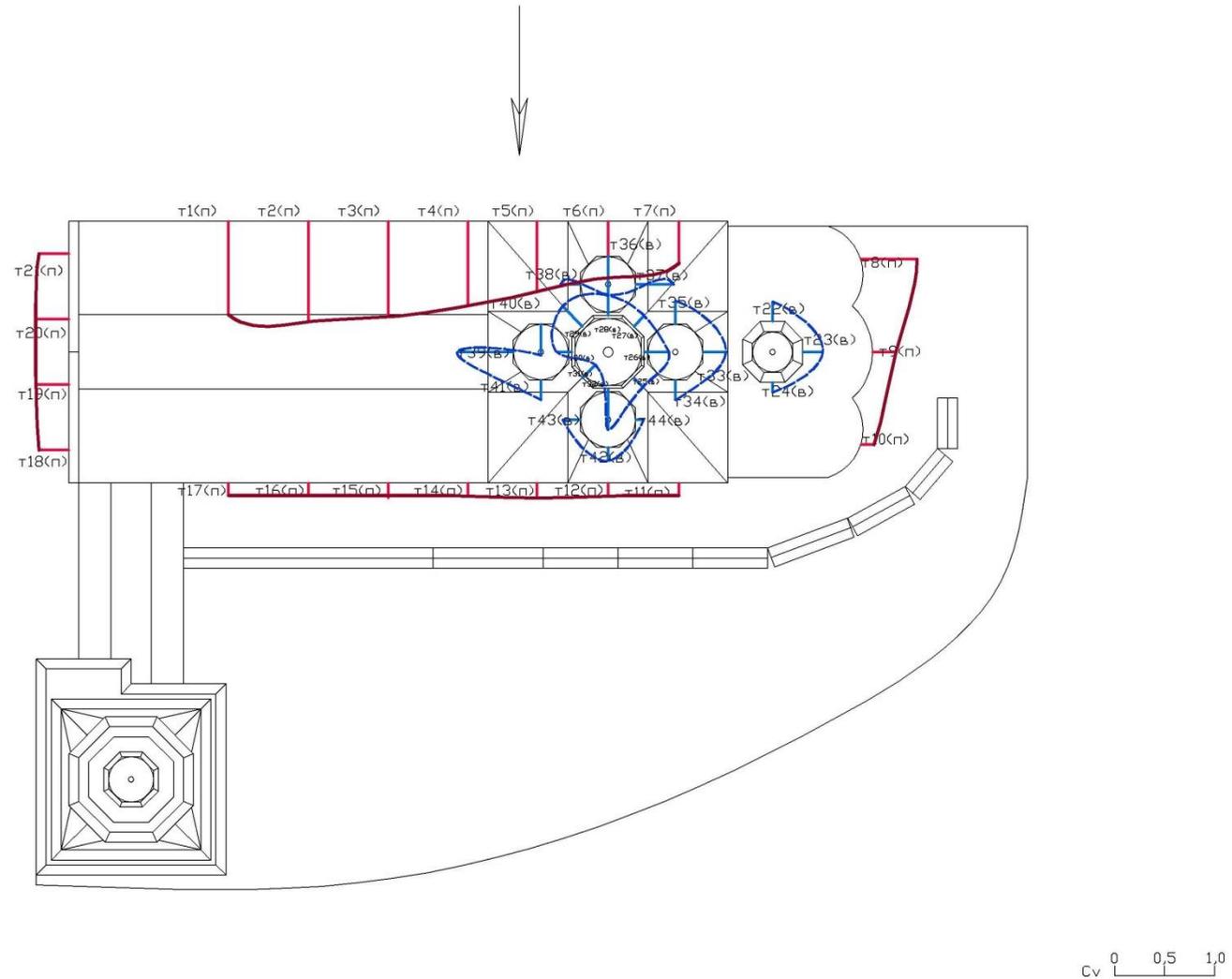
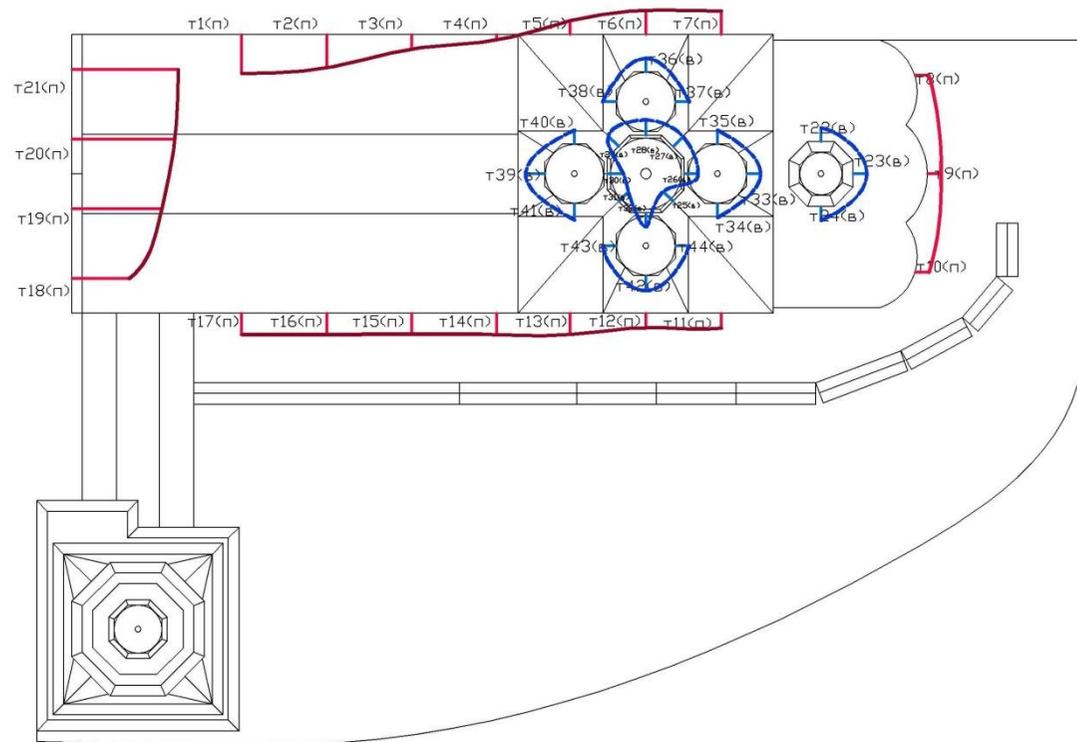


Рис Б.17 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при северном направлении ветра



$C_v$  0 0,5 1,0

Рис Б.18 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-западном направлении ветра

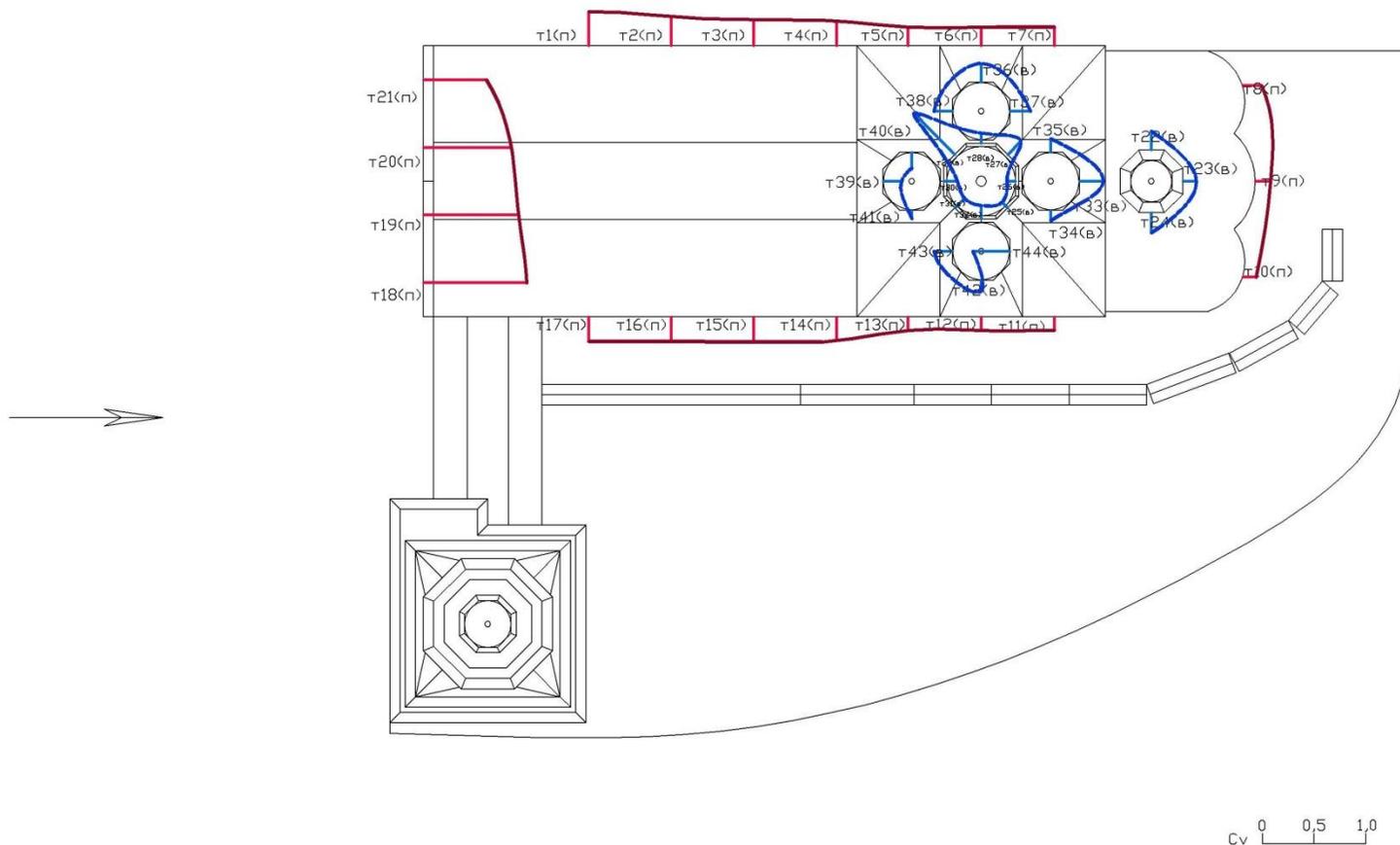


Рис Б.19 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при восточном направлении ветра

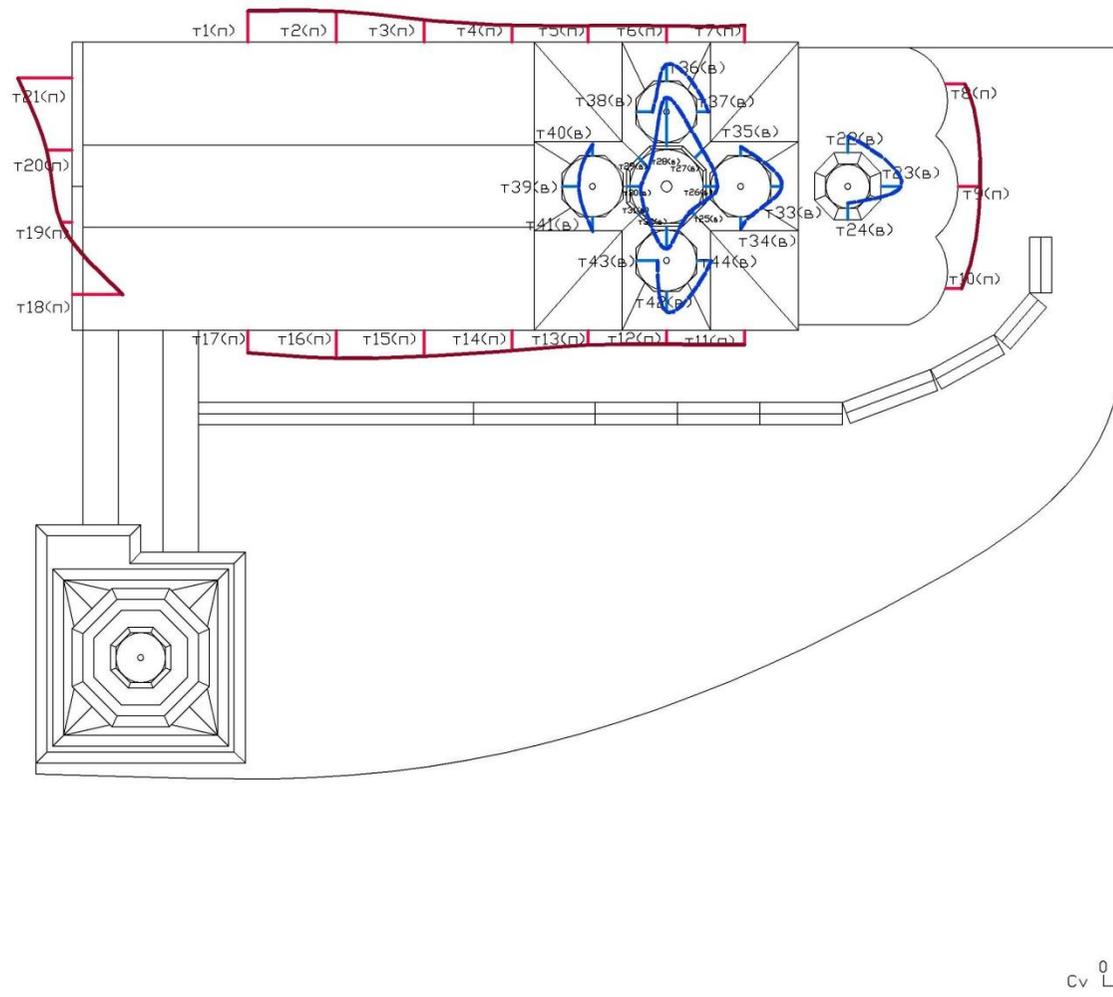


Рис Б.20 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-восточном направлении ветра

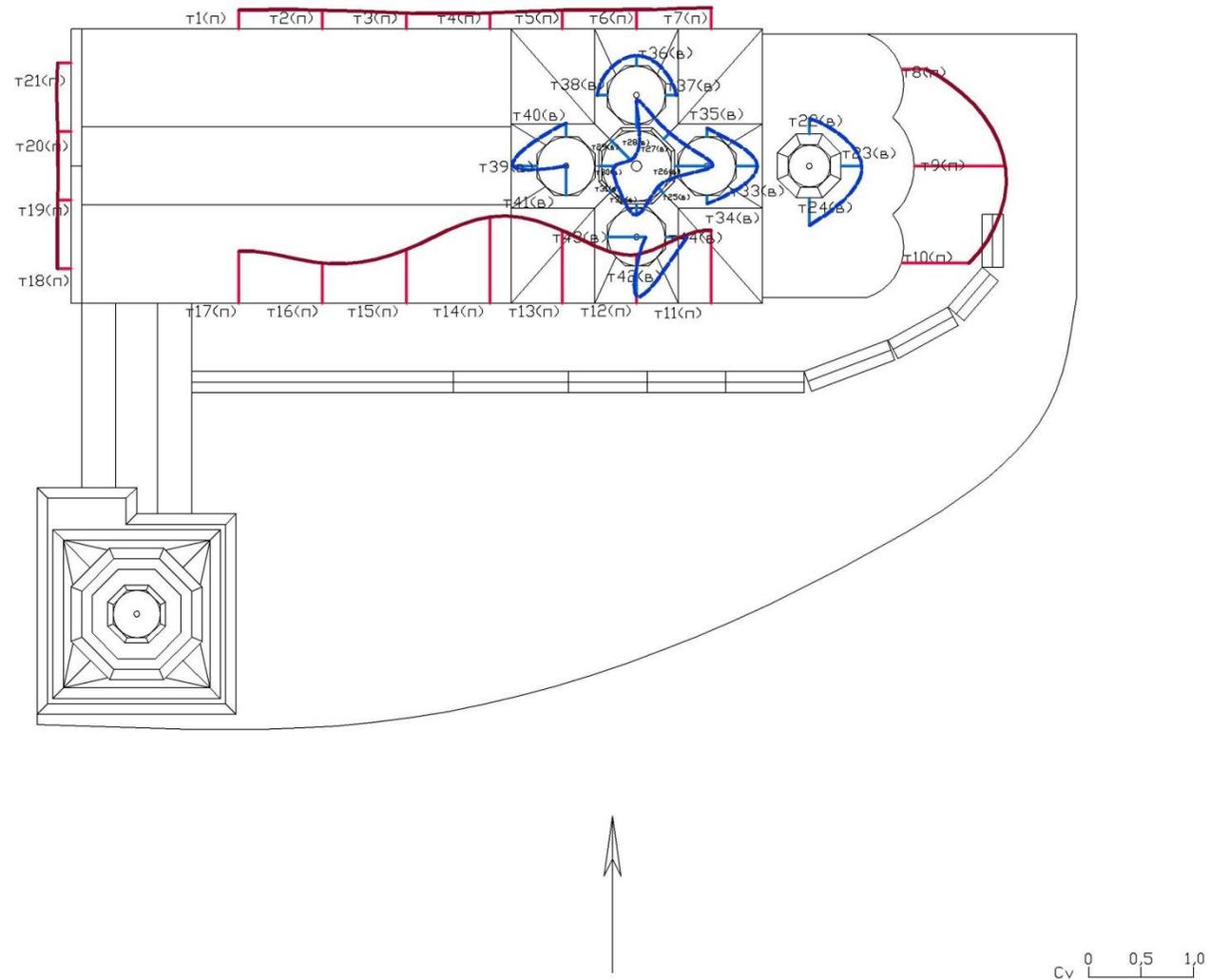


Рис Б.21 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при южном направлении ветра

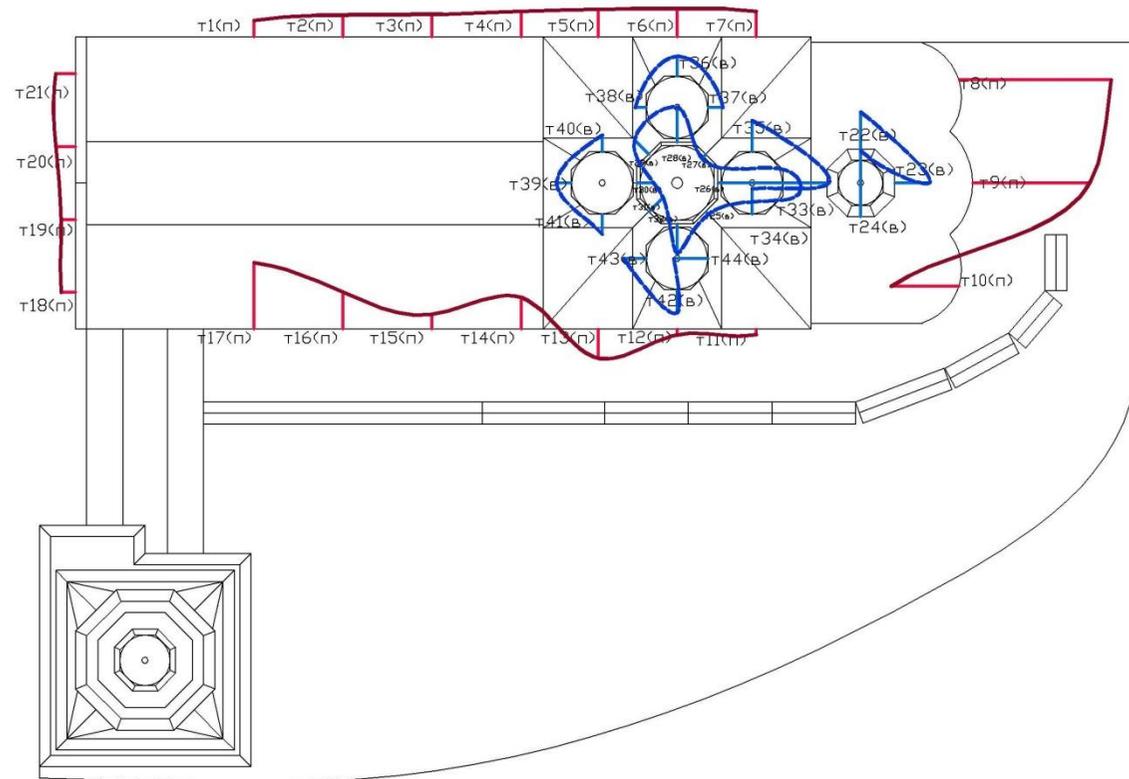


Рис Б.22 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-восточном направлении ветра

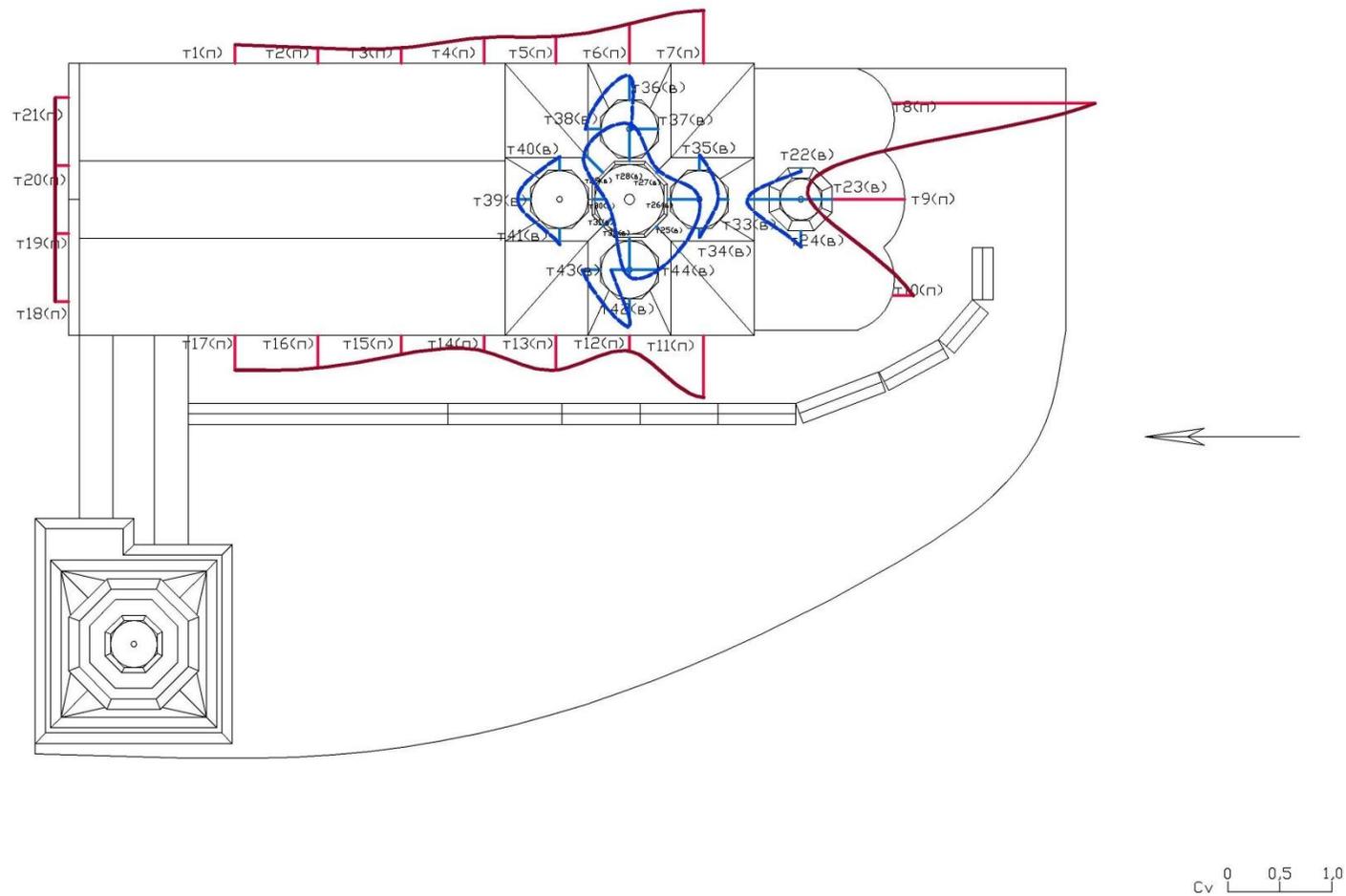


Рис Б.23 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при восточном направлении ветра

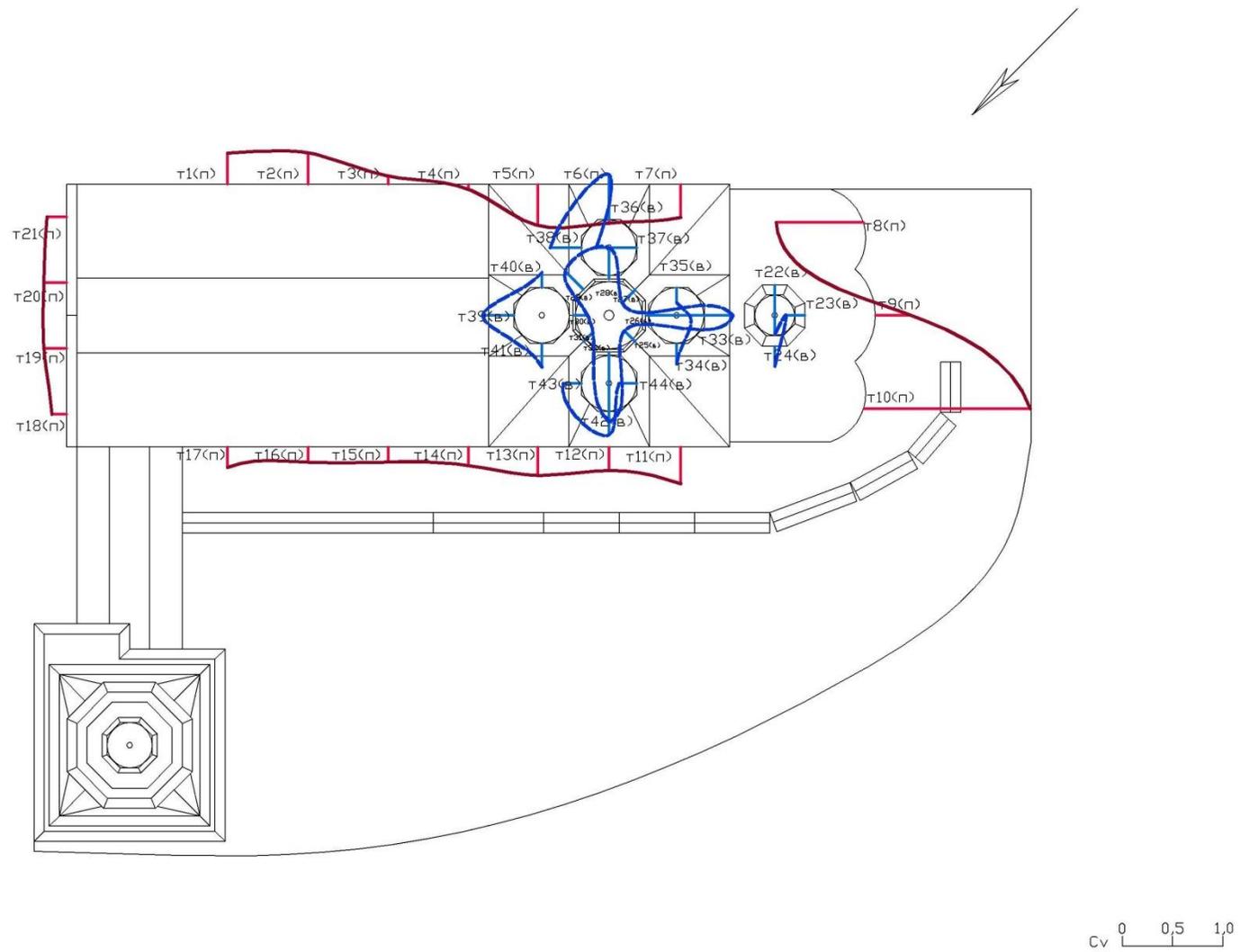


Рис Б.24 Рождественская церковь. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-восточном направлении ветра

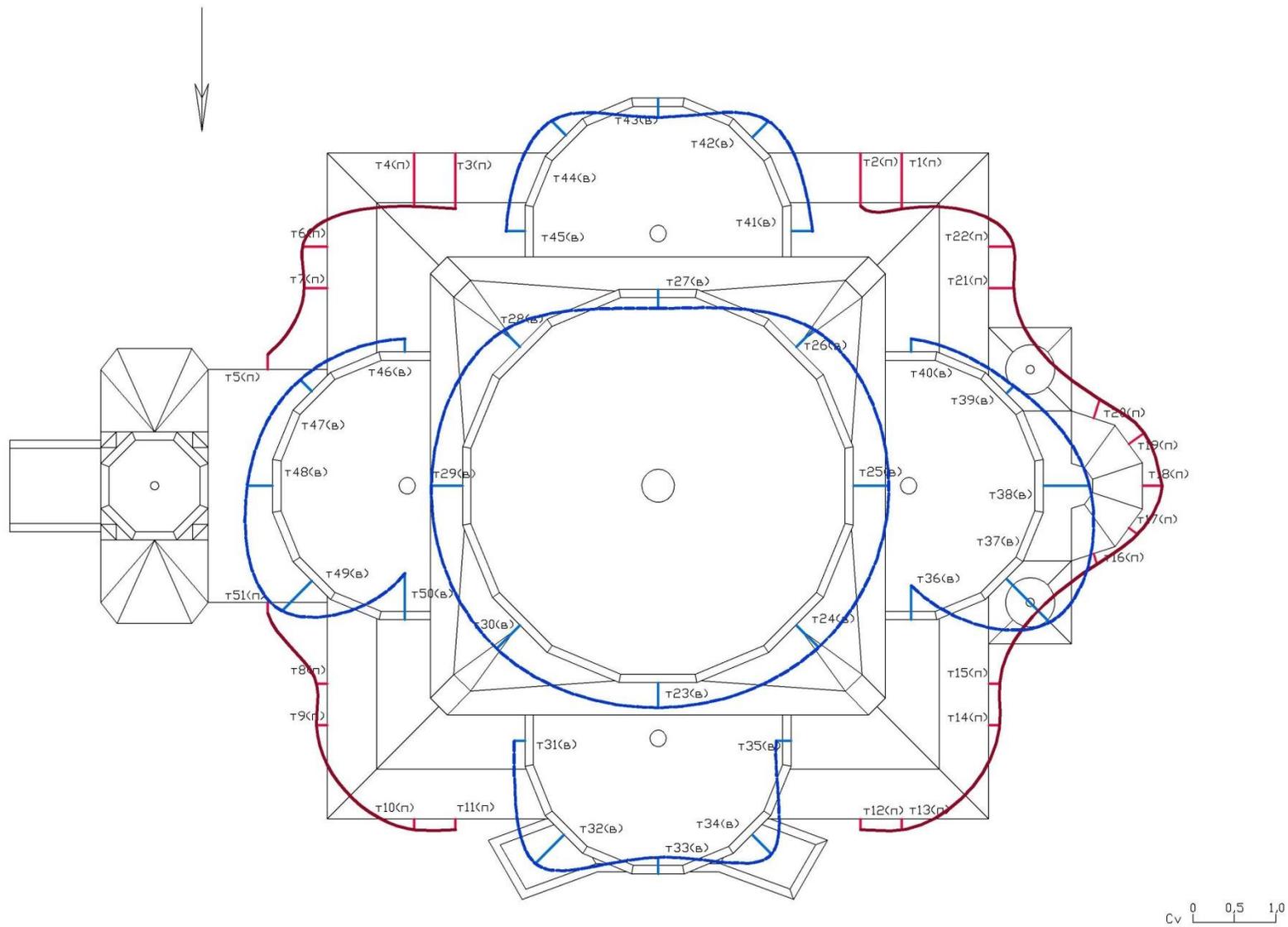


Рис Б.25 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при северном направлении ветра

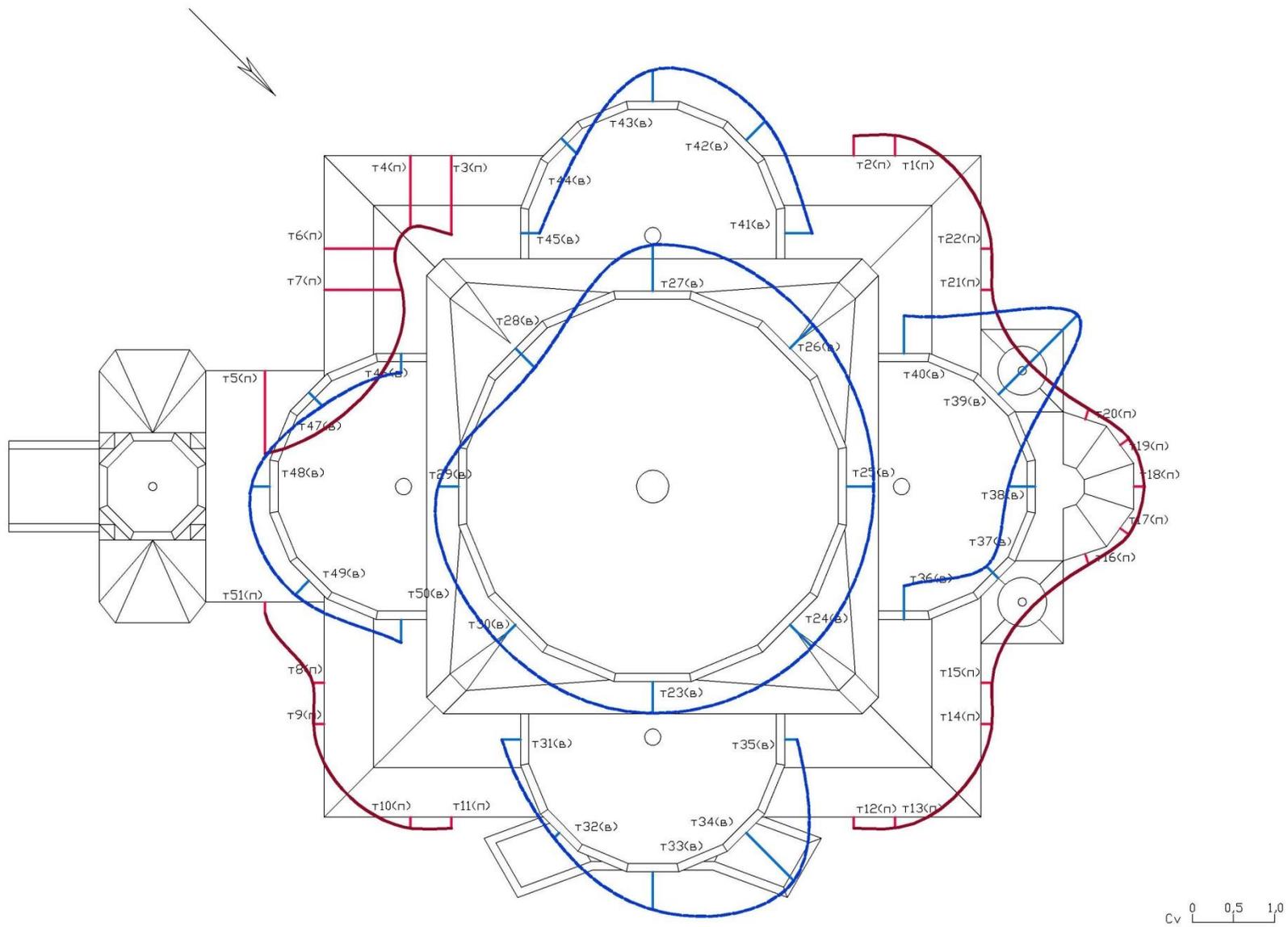


Рис Б.26 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-западном направлении ветра

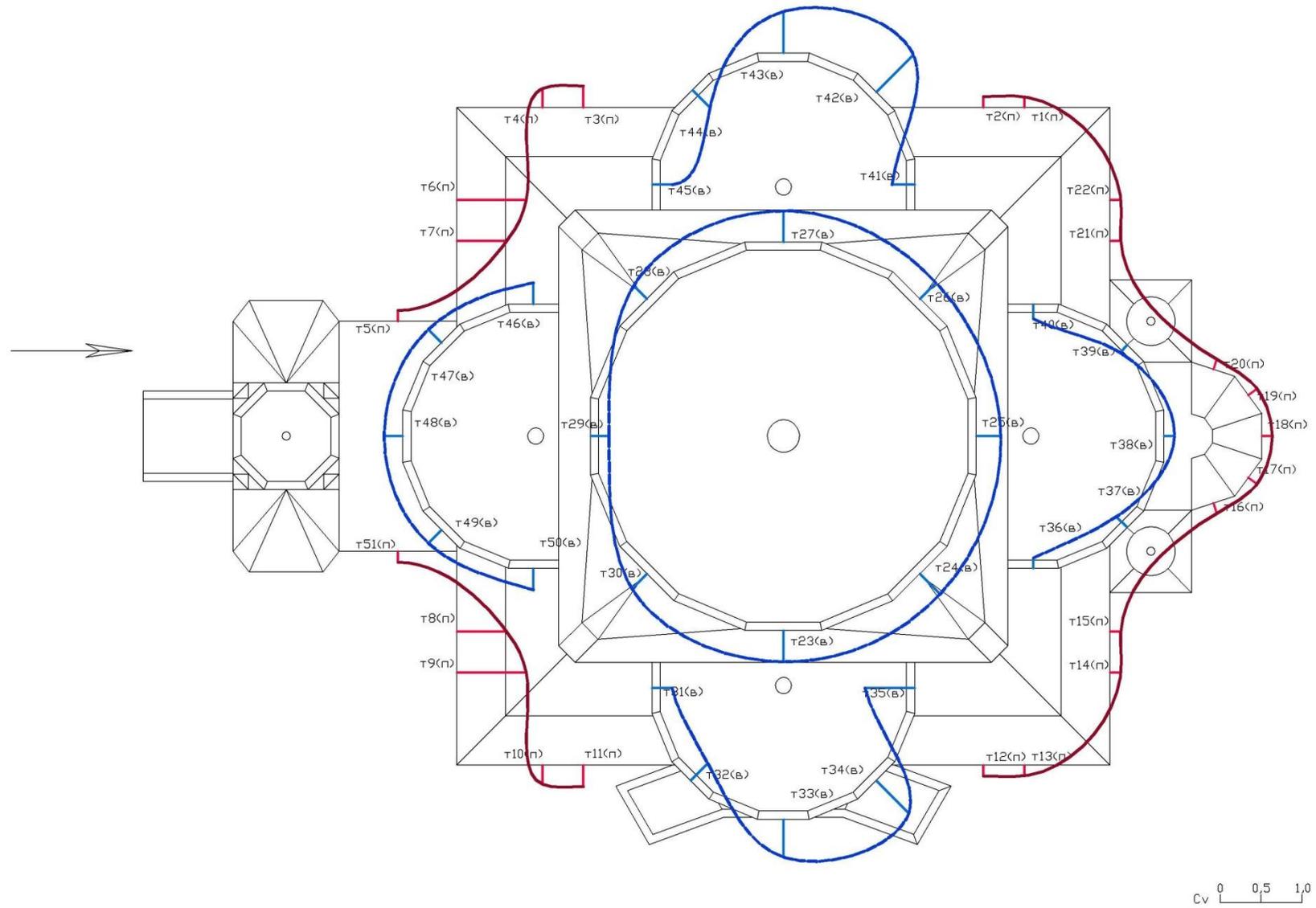


Рис Б.27 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при западном направлении ветра

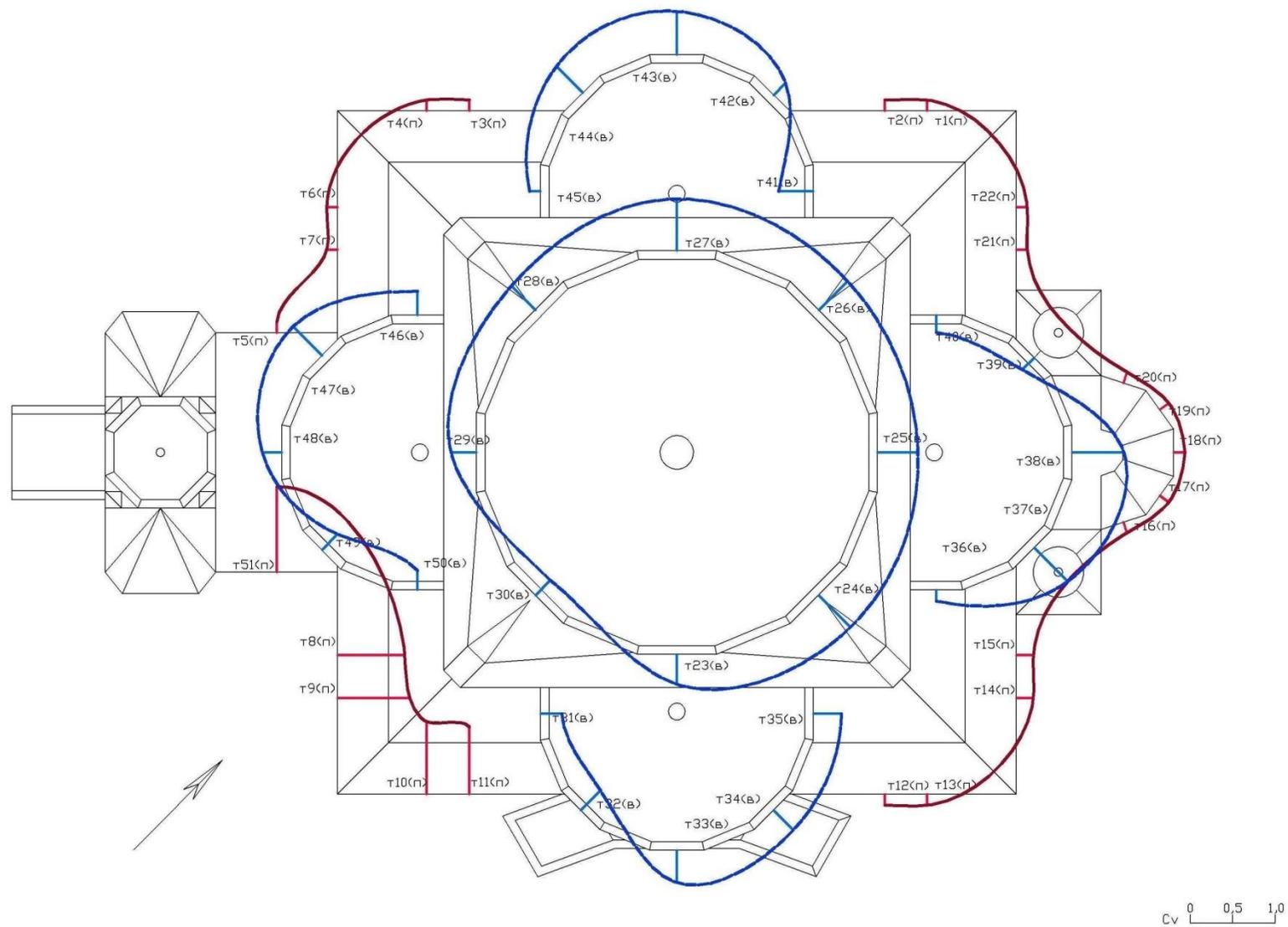


Рис Б.28 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-западном направлении ветра

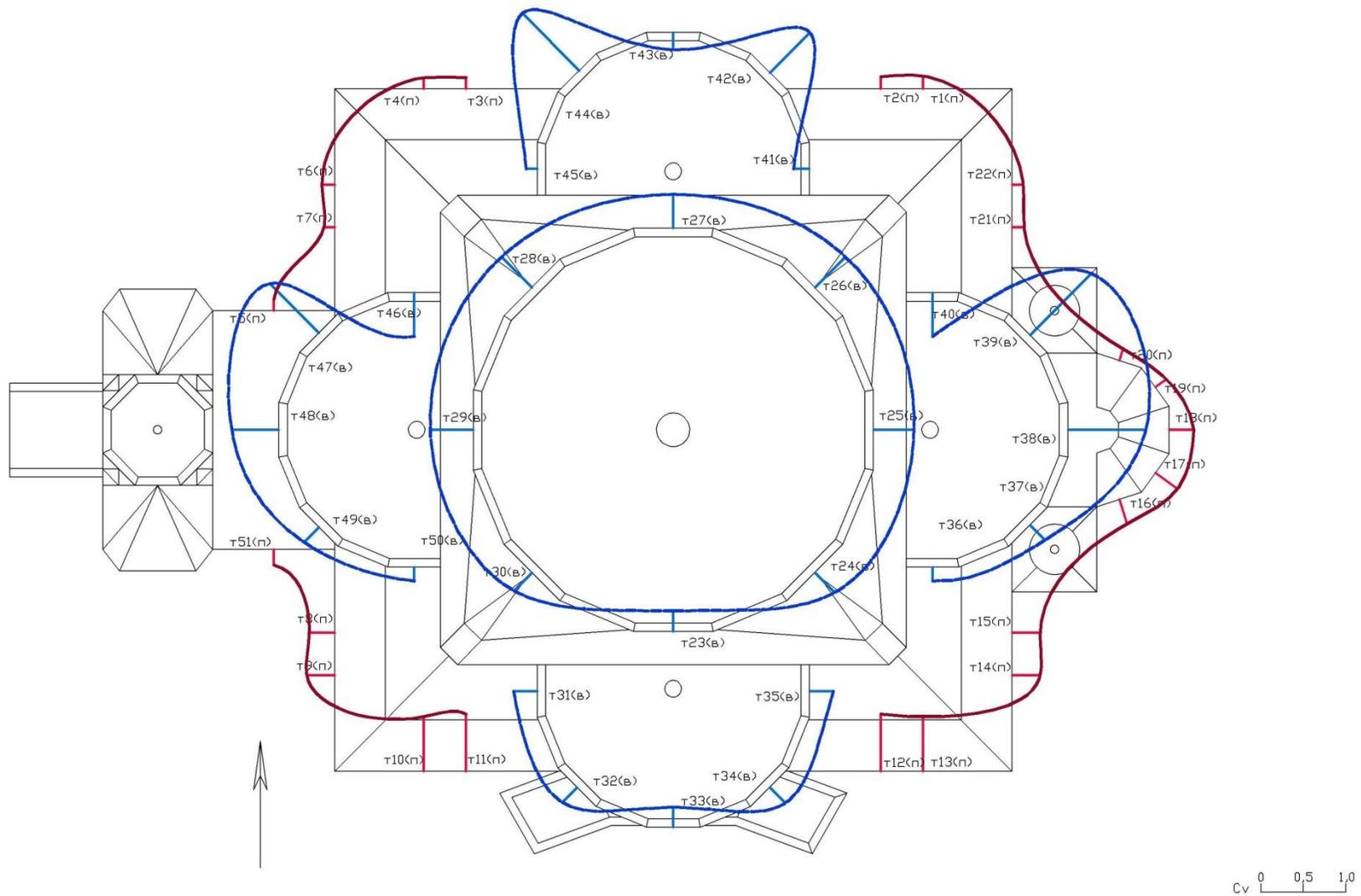


Рис Б.29 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при южном направлении ветра

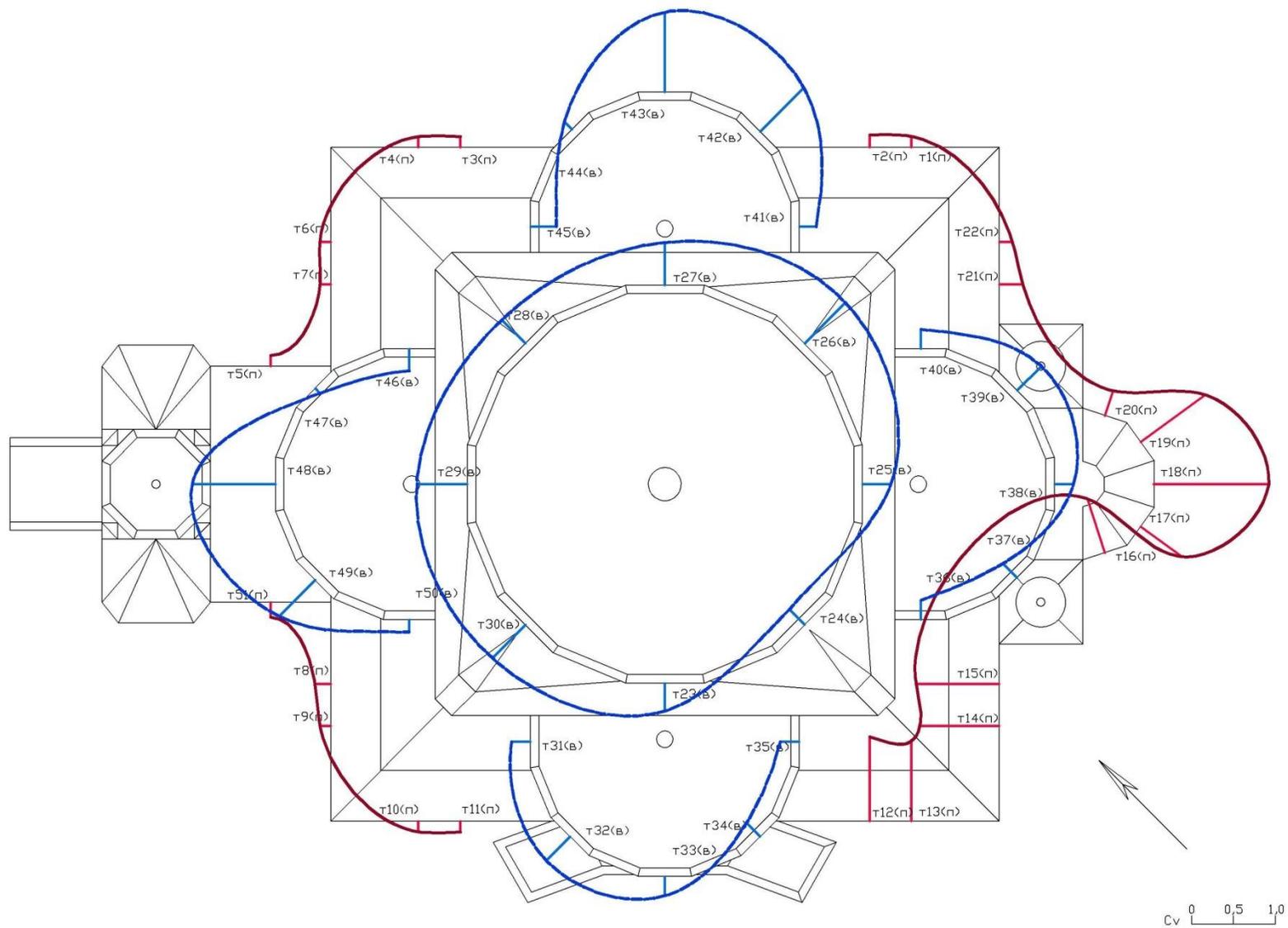


Рис Б.30 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при юго-восточном направлении ветра

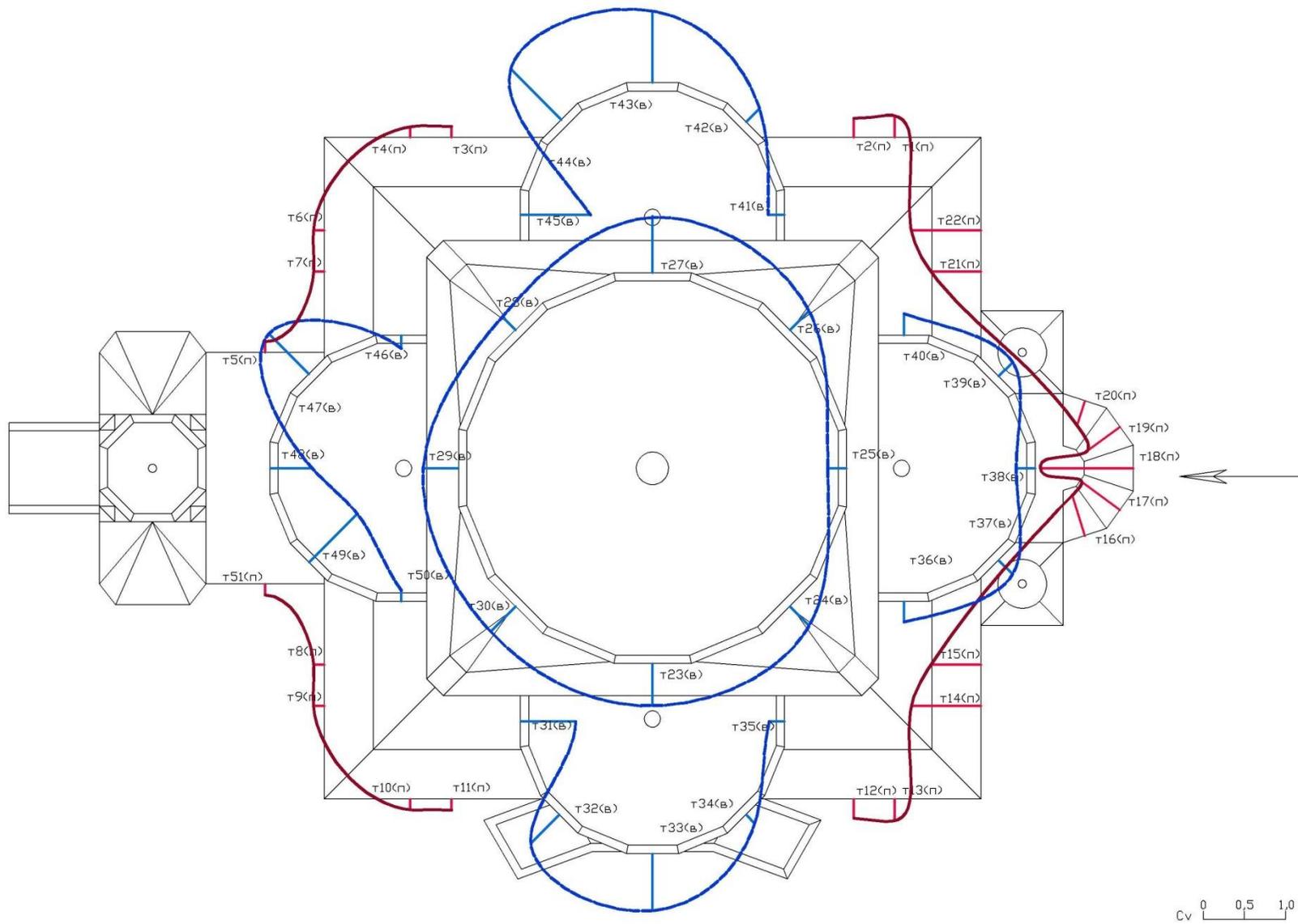


Рис Б.31 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при восточном направлении ветра

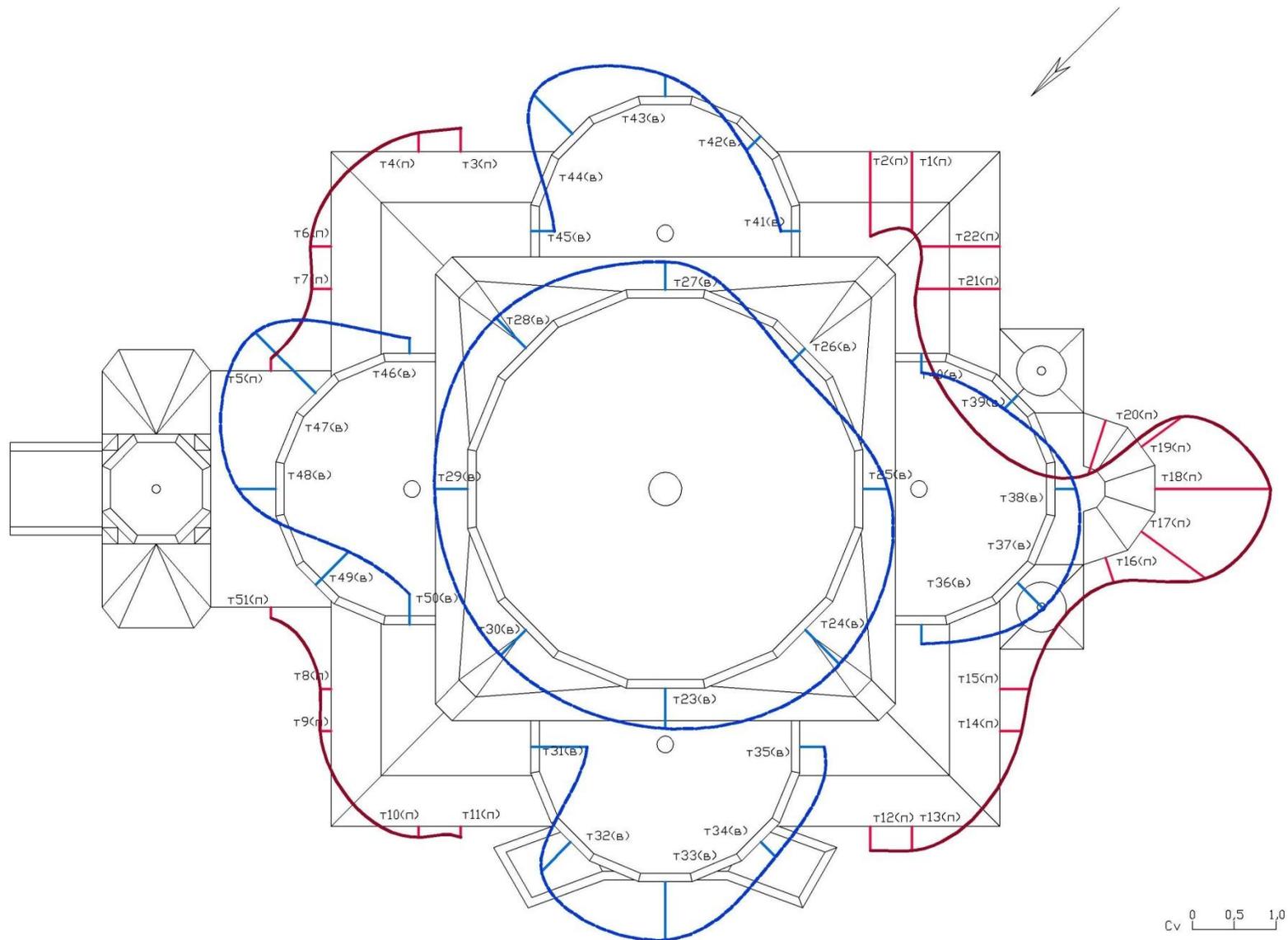


Рис Б.32 Спасо-Преображенский собор. Значения аэродинамических коэффициентов при северо-восточном направлении ветра

Кочев Алексей Геннадьевич  
Соколов Михаил Михайлович

Влияние внешней аэродинамики  
на микроклимат православных храмов

*Научная монография*

Подписано в печать      Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная.  
Уч. изд. л. 11,4. Усл. печ. л. 11,8. Тираж 500 экз. Заказ №

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65  
<http://www.nngasu.ru>, [srec@nngasu.ru](mailto:srec@nngasu.ru)